

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

Az Egyesület Elnökének üzenete

OTKA-projektek 5. seregszemléje

A Magyar Geofizika bibliográfiája

A mágneses permeabilitás meghatározása inverzióval

Sorfejtéses inverzió V. Gyors 2D geoelektromos inverziós módszer

Válasz Szalay István hozzászólására

Inhomogenitások lehatárolása elektromágneses
frekvenciaszondázások alapján

A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c.
OTKA-projekt eredményeiből

Elektromágneses módszerfejlesztések a mérési adatokban lévő
földtani információ hatékonyabb és stabilabb feltárása céljából

Megemlékezés és jubileumi tudományos ülés az ELTE Geofizikai és
Űrtudományi Tanszék alapításának 60. évfordulója alkalmából

Megemlékezés és kiállítás a Miskolci Egyetemen
Csókás János professzor halálának 10. évfordulóján

A 2010. évi PRO GEOPHYSICA Emlékérmek átadása

A Balkán Geofizikai Kongresszusról



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

51. évfolyam (2010) 4. szám



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

TARTALOM • CONTENTS

SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

- 171 Az Egyesület Elnökének üzenete (Message from President of Association) – *Király András*
171 Köszönet a lektoroknak! (Thanks to the referees) – *Bodoky Tamás*
172 Helyesbítés (Erratum) – *Bodoky Tamás*

MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

- 173 OTKA-projektek 5. seregszemléje (5th review session of OTKA projects) – *Kakas Kristóf*
173 A *Magyar Geofizika* bibliográfiája (Bibliography of *Magyar Geofizika*) – *Nagy Zoltán*

TANULMÁNYOK • PAPERS

- 175 A mágneses permeabilitás meghatározása inverzióval (Determination of magnetic permeability by inversion) – *Prácsér Ernő*
185 Sorfejtéses inverzió V. Gyors 2D geoelektromos inverziós módszer (Series expansion based inversion V. A quick 2D geoelectric inversion method) – *Gyulai Ákos, Ormos Tamás, Dobróka Mihály*
196 Válasz Szalay István hozzászólására (Reply to I. Szalay's comment on my paper "Follow-up of a seismic shallow refraction section") – *Polcz Iván*

OTKA-PROJEKTEK • OTKA PROJECTS

- 198 Inhomogenitások lehatárolása elektromágneses frekvenciaszondázások alapján (Inhomogeneity delineation based on electromagnetic frequency sounding) – *Pethő Gábor, Takács Ernő, Ficsór Lajos, Szabó István*
209 A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c. K49604. sz. OTKA-projekt eredményeiből (From the results of the OTKA project “Non-conventional geoelectric arrays” K49604) – *Szalai S., Varga M., Novák A., Szarka L.*
227 Elektromágneses módszerfejlesztések a mérési adatokban lévő földtani információ hatékonyabb és stabilabb feltárása céljából (Development of Electromagnetic (EM) Methods tending to more efficient and more stable revelation of the geological information from field data) – *Turai Endre, Dobróka Mihály, Takács Ernő, Szabó István, Szabó Norbert Péter, Vass Péter, Herczeg Ádám*

HÍREK • NEWS

- 238 Megemlékezés és jubileumi tudományos ülés az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék alapításának 60. évfordulója alkalmából (Scientific session on the occasion of the 60th anniversary of the establishment of Geophysical Chair at the Budapest University) – *Lenkey László*
239 Megemlékezés és kiállítás a Miskolci Egyetemen Csókás János professzor halálának 10. évfordulóján (Commemoration and presentation on the occasion of the 10th anniversary of Prof. J. Csókás's passing away at the University Miskolc) – *Pethő Gábor*
242 A 2010. évi PRO GEOPHYSICA Emlékérmek átadása (“Pro Geophysica” awards of 2010) – *Baráth István*
247 Magyar cikk vezet az olvasottságot – *Bodoky Tamás*
247 A Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának felhívása

BGS HÍREK • NEWS OF BALKAN GEOPHYSICAL SOCIETY

- 248 A Balkán Geofizikai Kongresszusról (On the Congress of Balkan Geophysical Society) – *Késmárky István*

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

51. évfolyam (2010) 4. szám

A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: bodoky@elgi.hu

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. BARÁTH ISTVÁN, HEGYBÍRÓ ZSUZSANNA, KAKAS KRISTÓF,

DR. LENKEY LÁSZLÓ, DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZARKA LÁSZLÓ,

VERŐ LÁSZLÓ

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: hockg@t-online.hu



Lapunk megjelenését a Magyar Olaj- és Gázipari Nyilvánosan Működő Részvénytársaság támogatja

A szerkesztőség a szakcikkeket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évzáró számban tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete
A kiadásért felel Király András

Szerkesztőség: 1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.
Telefon/Fax: (1) 201-9815
Titkársági e-mail: geophysic@mtesz.hu
Honlap: www.mageof.hu

Borító, tipográfia és nyomdai előkészítés:
EP Systema Bt., Budapest

Készült: NestPress Kft., 1116 Budapest, Vegyész u. 17–25.
Felelős vezető: Fekete Iván

Előfizethető a Magyar Geofizikusok Egyesületénél
(1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23., Tel./Fax: (1) 201-9815)
egyesületi tagoknak tagdíj ellenében.
Megjelenik évente négyszer

INDEX: 26 507
HU ISSN 0025-0120

Az Egyesület Elnökének üzenete

Ismét eltelt 2 év, és ezzel elérkezett az egyesületi tisztségviselők megválasztásának ideje.

Idén, 2011-ben többek között alelnököt is választunk Egyesületünk áprilisi Közgyűlésén, aki 2 év múlva veszi át az elnöki teendőket a jelenlegi alelnökünktől, *dr. Késmárky Istvántól*.

A Jelölőbizottság több, kiváló adottságú tagtársat is jelölhet alelnöki posztra, és a szavazók választása dönti el, hogy közülük kit látnának szívesen idén alelnökként és 2 év múlva pedig elnökként.

Sajnálattal értesültem a Jelölőbizottságtól arról, hogy néhányan csak azért nem vállalják a jelölést az elnöki posztra, mert értékelésük szerint nem ők a legesélyesebbek. Ezt

végtelenül hibás elgondolásnak tartom, mivel már maga a *jelölés* is megtiszteltetés. A jelölés lehetőséget ad az egyesületi szerepvállalásra, a jelölt bekerül a köztudatba, és a következő választáson ismét jelölhetik. Véleményem szerint már a jelölésnek is komoly rangja van, és más sikerét nem szabad személyes kudarcként megélni. Fontos, hogy több jelölt közül választhassanak a Közgyűlésen megjelenő tagtársak, ezért szeretnék minden, jelölésre esélyes tagunkat arra biztatni, hogy éljenek a megtiszteltetéssel és fogadják el a jelölést.

Budapest, 2011. február 17.

Király András
Elnök

Köszönet a lektoroknak!

A *Magyar Geofizika* 51. évfolyamának (2010) lektori teendőit az alábbi kollégák látták el:

Bodoky Tamás
Drahos Dezső
Gyulai Ákos
Kis Márta

Kiss Bertalan
Kovács Péter
Lenkey László
Ormos Tamás
Sátori Gabriella

Szabó Norbert
Szabó Zoltán
Turai Endre
Völgyesi Lajos

A *Magyar Geofizika* szerkesztősége tisztelettel megköszöni lektorainak önként vállalt tevékenységét. Szakértelmüknek és alapos munkájuknak köszönhető, hogy a lap „lektorált szaklap”-nak, és a benne megjelent szakkikkek tudományos publikációnak minősülnek.

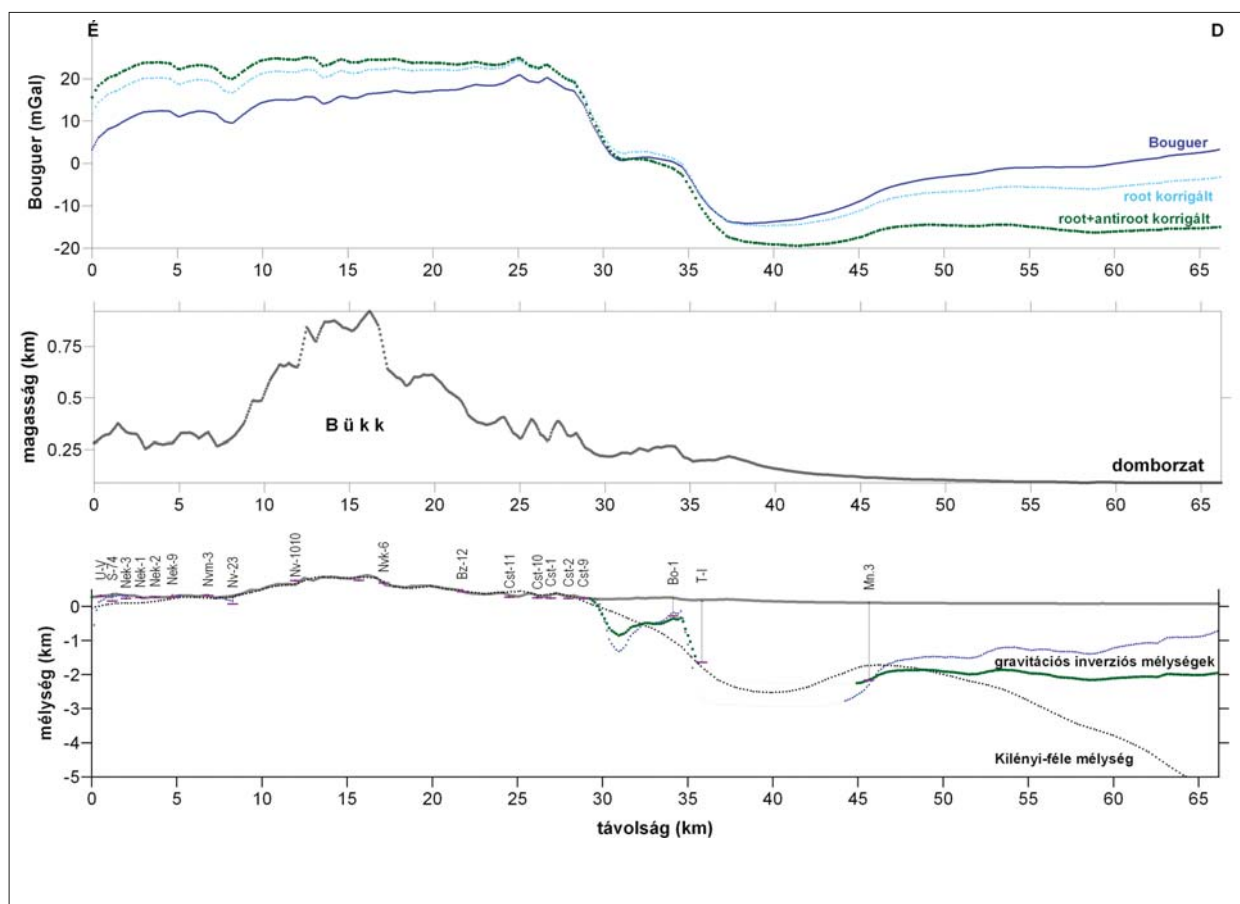
Bodoky Tamás

Helyesbítés

A nyomda elnézést kér a lap olvasóitól illetve Kiss János szerzőtől, mert az előző lapszámban közölt (*Magyar Geofizika* 51. évf. 3. szám, 150–162 oldal), „A mélymedencék izosztatikus hatása” című cikkének 14. ábráját a 160. oldalon hibásan, a színes részek elhagyásával nyomtatta ki, és így az ábra érthetlenné vált.

Az ábrát az alábbiakban helyesen megismételjük, ugyanakkor annak hibátlan változata a cikk online változatában is megtalálható, ott eredetileg is helyesen jelent meg.

Bodoky Tamás



14. ábra Közel É–D irányú gravitációs modellszelvény a Bükk és a hegység D-i előterén keresztül kétréteges inverziós mélységmeghatározás eredményeivel

Figure 14 A North–South oriented gravity model profile at the foreground of Bükk mountains with the depths of two-layered gravity inversion

Kiss János: „A mélymedencék izosztatikus hatása” című cikkének eredeti, 14. ábrája
(*Magyar Geofizika* 51. évf. 3. szám, 160. oldal)

OTKA-projektek 5. seregszemléje

Az MTA Geofizikai Tudományos Bizottság az ELGI és a Magyar Geofizikusok Egyesülete közös rendezésében 2010. november 24-én (szerdán) 10 órától az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet konferenciatermében került sor a „Geofizikai OTKA projektek V. seregszemléje” c. egész napos rendezvényre. A rendezvény alkalmából a projektekről rövid prezentációk hangzottak el, ezek anyaga (PDF formátumban) megtalálható az Egyesület honlapján (lásd <http://www.mageof.hu/m2new06.htm>). Az alábbiakban (az előadók neve szerint) felsoroljuk a bemutatott pályázatokat. A témavezető és a társszerzők nevei a feltöltött fájlokban fel vannak tüntetve.

Balázs László: Mérnökgeofizikai szondázások elméleti modellezése

Dobróka Mihály: Módszerfejlesztés mélyfúrási geofizikai adatok integrált intervalluminverziójára földtani szerkezetek morfológiájának meghatározása céljából

Dombrádi Endre: TECTOP-Magyarország – Jelenkori deformáció és tektonikus topográfia Magyarország területén: aktív szerkezetek, szeizmotektonikus viszonyok, vízhálózat-fejlődés és medenceinverzió dinamikája

Gyulai Ákos: Hulladéklerakók és környezetük állapotfelmérése geofizikai módszereinek fejlesztése

Horváth Ferenc: Integrált kutatómódszer kifejlesztése negyedidőszaki környezeti állapotok geofizikai vizsgálatára

Kiss János: Mágneses fázisátalakulás a földkéregben és geofizikai következményei

Kiss János: Magyarország gravitációs lineamenstérképe
Mártonné Szalay Emő és Márton Péter: Harmadkori vulkáni horizontok korrelálása paleomágneses mérésekkel

Mártonné Szalay Emő: A Dunántúli-középhegység és környezetének mozgástörténete 160 és 50 millió év között: integrált paleomágneses, tektonikai, üledékföldtani ösföldrajzi kutatás

Pethő Gábor: Inhomogenitások lehatárolása elektromágneses frekvenciaszondázások alapján

Scholtz Péter: Megnövelt térbeli mintavételezésű szeizmikus reflexiós mérések feldolgozása

Szalai Sándor: Nem konvencionális geoelektromos elrendezések

Székely Balázs: A kvarter felszínfejlődés vizsgálata numerikus felszínfejlődési modellek (SPM), távérzékelte adatok és terepi vizsgálatok segítségével a Dunántúl középső régiójában

Turai Endre: Elektromágneses módszerfejlesztések a mérési adatokban lévő földtani információ hatékonyabb és stabilabb feltárása céljából

A pályázatok eredményeit bemutató posztterek még tavaly december elejéig megtekinthetők voltak az Intézet konferenciatermében.

Kakas Kristóf

A Magyar Geofizika bibliográfiája

Az MGE Tudománytörténeti Bizottság programjába került a *Magyar Geofizika* 1960–2009 közötti 50 évfolyamában közölt tartalom bibliográfiai feldolgozása. Ennek elsődleges célja a lapban közölt szakcikk, dolgozatok bibliográfiájának létrehozása, ami lehetővé teszi az elmúlt 50 évben közölt publikációk szakirányultságának áttekintését, vizsgálatát, a lapban megjelent szerzők és munkásságuk kereshetővé tételét.

A Tudománytörténeti Bizottságon belül, a *Magyar Geofizika* eddig megjelent számainak birtokában felvállalva ezt a feladatot, a 2010. évre kitűzött céloom az 1960–1989 közötti 30 évre kiterjedő időszakban megjelent B5 formátumú (kisalakú) lapszámok feldolgozása volt. 2010 végéig azon-

ban sikerült az 1991. évig terjedő, összesen 32 évfolyamra elvégezni a feldolgozást.

Időközben a lap szerkesztősége az Egyesület elnökségének állásfoglalása szerint megkezdte a *Magyar Geofizika* utóbbi évfjaraainak digitalizálását és közzétételét az Egyesület honlapján. Így – látszatra – a további évfolyamok feldolgozását már oka fogyottnak láttam 2010 végén, és az addig elkészült anyagot CD-n rögzítve eljuttattam a Bizottság elnökének, illetve a lapunk főszerkesztőjének. Ennek kapcsán azt a felvilágosítást kaptam, hogy technikai okokból, célszerű lenne a feldolgozást tovább folytatni, egészen a 2004. évben megjelent lapszámokig.

A munka tehát 2011-ben is folytatódik és remélem, hogy az év első felében befejezhető lesz.

Már az első néhány év anyagának feldolgozásából kiderült, hogy a lapunk közléseiben, a szakcikkek mellett, jelentős részt képeznek olyan lapszemlék, könyvszemlék, valamint egyesületi híradások, amelyek a tudománytörténeti érdeklődés szempontjából ugyanúgy összegyűjtésre, regisztrálásra érdemesek, mint az eredeti célkitűzésben szereplő szakmai publikációk. Ezek megjelentetése döntő mértékben dr. Tóth Géza („Géza bácsi”) tiszteleti tagunknak, a lap akkori szerkesztőségi munkatársának köszönhető, aki széles látókörű kitekintéssel, nagy odafigyeléssel szemlélte a rokon vagy társtudományok és a geofizikát felhasználó ipar, bányászat és egyéb szakterületek hivatalos vagy szakmai közleményeiben a geofizika szemszögéből érdekes közléseket, illetve az egyesületi tagoknak ezekben az orgánumban közzétett dolgozatait, beszámolóit. Ugyanakkor, ez a lapszemlézés nem terjedt ki a MÁELGI által kiadott *Geofizikai Közleményekre*, mivel annak példányait tagságunk korábban egyesületi szolgáltatásként megkapta.

Tudománytörténeti szempontból megkülönböztetett figyelemre érdemesek az időközben elhunyt tagtársainkról a lapban közzétett megemlékezések, nekrológok is. Ezek különösen az Egyesület kiemelkedő tudósainak életpályájuk megismeréséhez és emléküik méltó ápolásához képeznek értékes ismereteket.

Mindezek figyelembevételével a *Magyar Geofizika* bibliografikus feldolgozásánál alkalmazott módszer a következő:

1. Az 1960. évben megjelent 1. számtól kezdve, időrendi sorrendben történt, laponként a közölt tartalomjegyzék beszkenelése (a szerző(k) neve, a közlemények címe és első oldalának oldalszáma). Ezt követően történt a lapban szétválasztva közölt lap- és könyvszemlék, valamint egyesületi hírek szövegének szkennelése.

2. A szövegek szkennelése szerkeszthető formátumot eredményezett, melynek során azok átolvasása és a karakterfelismerés esetleges hibáinak kijavítása megtörtént. Ugyanekkor elhagytam a lap- és könyvszemlékből, a bibliográfia szempontjából felesleges, kommentáló vagy részleteket ismertető részeket.

3. A lapszemlék, a szemlélőre történő hivatkozással, az idézett laponként elkülönítve, felsorolják a geofizikai szempontból (és elsősorban az egyesületi szerzők szempontjából) érdekesnek tartott cikkeket. Kivételes esetekben a szemlélő egyes figyelemre méltó észrevételeit is meghagytam, bár az az alap gondolat az, hogy a bibliográfia elsősor-

ban a publikációk regisztrálását szolgálja, a részleteket illetően a *Magyar Geofizika* eredeti példányai képezik a hiteles információforrást.

4. Nem kerültek bele a feldolgozásba olyan lapszemlék, amelyek egy másik geofizikai orgánumban (pl. *Geophysical Prospecting*, *Geophysics* stb.), időszerte megjelent példányának cikkei sorolták fel (pl. így: „Miről írt a Geophysics ez évi decemberi száma?”).

5. Az előzőek szerinti, időrendben feldolgozott ilyen „bibliográfiai egységek” (amelyeken egy, a *Magyar Geofizikában* közölt publikáció vagy egy lapszemlében idézett publikáció, könyv, illetve egyesületi híradás, megemlékezés értendő), egy Excel táblázat egy-egy sorát képezik. Minden sorhoz hozzátartozik a vonatkozó év és a lap évfolyamának megjelölése, valamint az aktuális lapszám megadása, elkülönített oszlopokban. Ugyanígy szerepel oszloponként elkülönítve a szerzők neve, illetve a közlemény címe és a kezdő oldalszám. Ebben a szerkezetben az Excel normál keresőjével kereshetünk a szerzőkre, lapszámra stb.

6. Tekintettel a bibliográfiai egységek számára, (amelyben az első 10 évhez tartozó 385 bibliográfiai egység a következő öt év alatt kb. kétszeresére, majd az ezt követő öt évben ennek szintén kb. kétszeresére növekedett) az első 10 évfolyam adatai egy Excel munkalapra kerültek, majd az ezt követő időszakban öt évfolyamonként vannak egy-egy Excel munkalapon rögzítve. Az eddig elkészült bibliográfia egy Excel-állományt képez, és az a *Magyar Geofizika* 1960–1994. évek közötti 35 évfolyamának feldolgozását tartalmazza.

7. A későbbi felhasználás és kezelhetőség érdekében minden regisztrált bibliográfiai egység (Excel táblázatsor) egyedi azonosító sorszámmal kapott. Ez a sorszám folytatódik az elkülönített munkalapokon keresztül is. Ezáltal követhető a regisztrált bibliográfiai egységek mennyisége, továbbá minden egység egy azonosító sorszámmal rendelkezik a teljes feldolgozáson belül. Az Excel munkafüzet „Állapot” nevű munkalapja tartalmazza az egyes lapszámoknál regisztrált tételek első és utolsó azonosító sorszámmát, valamint az egyes munkalapokhoz tartozó feldolgozott lapévfolyamok és lapszámok listáját is.

Az eddig feldolgozott bibliográfia, illetve a még elvégzendő munka hasznát egyedül az iránta érdeklődők számára való közvetlen hozzáférhetőség adhatja. Ezért a szerző javasolja, hogy az Egyesület vezetősége biztosítsa a bibliográfia hozzáférhetőségét az MGE honlapján.

Nagy Zoltán

A mágneses permeabilitás meghatározása inverzióval

PRÁCSEER ERNŐ[@]

MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, H-9400, Sopron, Csatka E. u. 6–8.

[@]E-mail: pracser@ggki.hu

Régebben a közegek mágneses permeabilitásának a vákuumétól esetlegesen eltérő értékét nem vették figyelembe a modellezések során. Most kísérletet teszünk a rétegparamétereknek – beleértve a mágneses permeabilitást is – egydimenziós modell inverziójával történő meghatározására. Megmutatjuk, hogy síkhullámú gerjesztés esetén az egy rétegre jellemző három paraméter (fajlagos ellenállás, vastagság és mágneses permeabilitás) közül nem határozható meg valamennyi. Megállapításainkat az előremodellezést meghatározó képletekre és a linearizált inverzió minőségét jellemző felbontóképesség mátrixára alapozzuk. Ezzel ellentétben a nem síkhullámú gerjesztés során lehetőség van egy réteg mindhárom paraméterének a számítására.

Prácsér, E.: Determination of magnetic permeability by inversion

In the past the value of the magnetic permeability of mediums, differing from the vacuum was not considered during the modeling. In this paper the determination of all layer parameters, including also the magnetic permeability is attempted by the inversion of a one dimensional model. It is shown that in case of plane wave excitation all of the three parameters (resistivity, thickness and magnetic permeability) characterizing a layer cannot be determined. Our statements are based on the forward modeling formulas and on the resolution matrix, qualifying the linearized inversion. Contrary to the plain-wave case, the determination of all the three parameters of a layer for the non-plane wave excitation is possible.

Beérkezett: 2011. január 11.; *elfogadva:* 2011. február 22.

Bevezetés

Korábban az elektromágneses módszerek matematikai modellezésekor a közegek mágneses permeabilitásának esetleges változását nem vették figyelembe. Azzal a feltételezéssel számoltak, hogy az megegyezik a vákuuméval. Annak ellenére, hogy a gyakorlatban ez többnyire elegendőnek bizonyult, az utóbbi időben felmerült annak az igénye, hogy a számítások vegyék figyelembe az anyag mágneses permeabilitását is, amely eltérhet a vákuumétól. Bizonyos kőzetek relatív mágneses permeabilitása 1 és 20 között változhat (Zhang, Oldenburg 1997). A mágneses permeabilitás változását okozhatja továbbá a nagyobb mélységekben a hőmérséklet megnövekedése is. A Curie-hőmérsékletnél az anyagok elvesztik permanens mágnesezettségüket, és ennek a hőmérsékletnek a közelében a Hopkinson-hatás az anyagok mágneses permeabilitásának a megnövekedését okozza (Kiss et al. 2005, Ádám 2008). A mágneses permeabilitás inverzióval történő meghatározásával Zhang és Oldenburg foglalkozott (1997) először arra az esetre, amikor az egydimenziós modellben ismert a vezetőképesség eloszlása. Az inverziót légi elektromágneses mérésekre alkalmazták. Zhang és Oldenburg egy következő munkája a vezetőképesség és a mágneses permeabilitás egy lépésben történő meghatározhatóságát elemezte (1999). A félteret felbontották

rögzített vastagságú rétegek sorozatára, és a rétegek vezetőképességét és mágneses permeabilitását határozták meg inverzióval. Ebben a cikkben az egydimenziós modellben vizsgáljuk a mágneses permeabilitás hatását az előremodellezésre és a hagyományos (linearizált), azaz nem az Occam-inverzióra. Kísérletet teszünk a mágneses permeabilitás inverzióval történő kiszámítására. Megmutatjuk, hogy síkhullámú gerjesztés esetén a három rétegparaméter (vezetőképesség, vastagság és mágneses permeabilitás) nem határozható meg egyértelműen. Ez az állítás matematikailag igazolható az előremodellező képletekkel, és ez összhangban van a linearizált inverzió felbontóképesség-mátrixával. A nem síkhullámú gerjesztés esetén viszont elméletileg lehetőség van az egydimenziós modell valamennyi rétegparaméterének a meghatározására. Ezt mágneses dipól gerjesztésű mérésekre mutatjuk meg, de a levont következtetések vonatkoznak más mesterséges gerjesztésű frekvenciaszondázásra és a tranziens elektromágneses mérésekre is.

A linearizált inverzió

A bemutatásra kerülő inverziós példák számításait iterációs elven működő linearizált inverzióval végeztük, amely a Jacobi-mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásán alapul. A \mathcal{J} Jacobi-mátrix a mérési adatok modellparaméterek sze-

rinti parciális deriváltjait tartalmazza. A szinguláris értékek szerinti felbontást matematikai szempontból Jackson (1972) elemzi kimerítően, a geofizikai inverziók elméletét Tarantola (1987) tárgyalja átfogóan. A Jacobi-mátrix a következőképpen bontható fel:

$$\mathcal{J} = \mathcal{U} \Lambda \mathcal{V}^T, \quad (1)$$

ahol Λ a sajátértékeket tartalmazó átlós mátrix, az \mathcal{U} és \mathcal{V} mátrixok az adat- és a paraméterterbéli sajátvektorokat tartalmazzák. A T felső index a mátrix transzponáltját jelöli. A sajátvektorok ortogonalitása miatt az \mathcal{U} és \mathcal{V} mátrixokra teljesülnek az

$$\mathcal{U}^T \mathcal{U} = \mathcal{I} \quad \text{és a} \quad \mathcal{V}^T \mathcal{V} = \mathcal{I}$$

egyenlőségek, ahol az \mathcal{I} az egységmátrix, amelynek a dimenziója megegyezik a nem 0 sajátértékek számával. Ahány λ_j sajátérték különbözik 0-tól, annyi független modellparaméter határozható meg. Az iterációs lépés stabilitását a legnagyobb (λ_{\max}) és a legkisebb (λ_{\min}) sajátértékek hányadosa határozza meg. Az a kedvező, ha ez az arány a lehető legkisebb. A \mathcal{J} mátrix $m \times n$ méretű, m a mérési adatok, n a modellparaméterek száma. A Jacobi-mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásából képezhető az általánosított, azaz a Lánczos-inverz, amely meghatározza a modellparaméterek (\mathbf{p}) megváltozása és a mérési adatok (\mathbf{m}) megváltozása közötti kapcsolatot. Röviden tekintsük át a Lánczos-inverz levezetését! Az (1) képlet alapján az előremodellezés linearizált változata

$$\Delta \mathbf{m} = \mathcal{U} \Lambda \mathcal{V}^T \Delta \mathbf{p}.$$

Szorozzuk meg ezt az egyenletet először \mathcal{U}^T -vel, majd Λ^{-1} -gyel

$$\Lambda^{-1} \mathcal{U}^T \Delta \mathbf{m} = \mathcal{V}^T \Delta \mathbf{p}.$$

\mathcal{V} -vel való szorzás után

$$\mathcal{V} \Lambda^{-1} \mathcal{U}^T \Delta \mathbf{m} = \mathcal{V} \mathcal{V}^T \Delta \mathbf{p}.$$

Ha feltételezzük, hogy a $\mathcal{V} \mathcal{V}^T$ mátrix az egységmátrix (Jackson 1972), akkor megkapjuk a linearizált inverzió Lánczos-inverzen alapuló képletét:

$$\Delta \mathbf{p} = \mathcal{V} \Lambda^{-1} \mathcal{U}^T \Delta \mathbf{m}. \quad (2)$$

A $\Delta \mathbf{p}$ megadja, hogy az éppen aktuális modellparamétereket (\mathbf{p}) milyen mértékben kell módosítani annak érdekében, hogy az ahhoz tartozó előremodellezési adatok (\mathbf{m}) közelebb legyenek a mérési adatokhoz, azaz a két vektor különbségének az L_2 normája csökkenjen. A $\Delta \mathbf{m}$ a mérési adatvektor és a \mathbf{p} paramétervektorhoz tartozó elméleti adatvektor különbsége. A (2) képletben a Λ^{-1} átlós mátrix j -edik eleme $1/\lambda_j$. Ha λ_j kicsi, akkor a reciprokanak a nagy értéke kedvezőtlenül hat az inverzió stabilitására. A gyakorlatban ezért $1/\lambda_j$ helyett ennek egy α csillapító tényezővel módosított változatát érdemes alkalmazni,

$$\frac{\lambda_j}{\lambda_j^2 + \alpha}. \quad (3)$$

A bemutatott inverziós tesztek során viszonylag nagy α értékeket alkalmaztunk, mivel a fő cél nem az inverzió gyorsasága volt, hanem annak az elemzése, hogy mely rétegeparaméterek határozhatók meg. Ehhez pedig fontos volt az inverzió stabilitása, amelyet a viszonylag nagy α érték biztosított. Az előremodellezés egydimenziós esetben olyan gyors, hogy az inverziós kísérletek során néhány száz iteráció elvégzése is csak másodperceket vett igénybe.

Az inverzió által szolgáltatott modellparaméterek megbízhatóságát általában a korrelációs mátrixszal jellemzik. Ez megadja ugyan, hogy két különböző modellparaméter között milyen szoros az összefüggés, de az már nem derül ki belőle, hogy a paraméterek (esetleg kettőnél több) között milyen függvénnyel kifejezhető kapcsolat van. Ezért most a korrelációs mátrix helyett a felbontóképességi mátrixot fogjuk vizsgálni. A felbontóképességi mátrix a Jacobi-mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásában (1) szereplő \mathcal{V} mátrixból képezhető

$$\mathcal{R} = \mathcal{V} \mathcal{V}^T. \quad (4)$$

Ez a mátrix megadja, hogy a paraméterek mely lineáris kombinációi határozhatók meg, azaz (2) helyett valójában az

$$\mathcal{R} \Delta \mathbf{p} = \mathcal{V} \Lambda^{-1} \mathcal{U}^T \Delta \mathbf{m} \quad (5)$$

képlet érvényes, amint az a (2) képlet levezetéséből kiolvasható. Abban a kedvező esetben, ha \mathcal{R} az egységmátrix, akkor az azt jelenti, hogy a \mathbf{p} paramétervektor valamennyi eleme meghatározható. Ha az inverziós algoritmus már konvergált egy olyan modellhez, amelyhez kellően kicsi illeszkedési hiba tartozik, akkor a további iterációs lépések alkalomával $\mathcal{R} \Delta \mathbf{p} = 0$ -nak kell teljesülnie. Ha a felbontóképességi mátrix az egységmátrix, akkor ez azt jelenti, hogy a modellparaméterek már alig változnak. Viszont, ha eltér az egységmátrixtól, akkor a gyakorlati számítások során előfordulhat a modellparaméterek változása úgy, hogy a módosított paraméterekkel számított modellezési adatok is jól illeszkednek a mérési adatokhoz. Ebben az esetben a szintetikus adatokkal végzett kísérleteknél az is megtörténhet, hogy az iterációk sorozatát a pontos modellparaméterekkel indítjuk, és az iterációk során kapott modellparaméterek egyre távolabb kerülnek a helyes paraméterértékektől.

Magnetotellurikus mérések inverziója a mágneses permeabilitás figyelembe vételével

Első lépésként elemezzük az egydimenziós direkt feladat megoldására szolgáló rekurziós képletet arra az esetre, amikor a rétegek mágneses permeabilitása is változhat. A magnetotellurikában a mérések feldolgozásának az első lépése az impedancia frekvenciánkénti meghatározása

$$Z(\omega) = E_x(\omega) / H_y(\omega).$$

Az impedanciából, amely egydimenziós esetben egy komplex szám, látszólagos fajlagos ellenállás és fázis számítható, többnyire ezek képezik az inverziós algoritmusok bemenetét

1. táblázat | Modellparaméterek magnetotellurikus inverzióhoz, a) szintetikus adatok számításához, b) inverzió eredménye helyes paraméterekből kiindulva

a)				b)			
réteg	ρ [Ωm]	d [m]	μ_{rel}	réteg	ρ [Ωm]	d [m]	μ_{rel}
1.	100	1000	1	1.	90,98	909,82	1,01
2.	20	500	100	2.	30,10	752,84	66,04
3.	100		1	3.	100,01		1,00

$$\rho_a(\omega) = \frac{|Z_1(\omega)|^2}{\omega\mu_1}, \quad \Phi(\omega) = \arctan\left(\frac{\text{Im}Z_1(\omega)}{\text{Re}Z_1(\omega)}\right).$$

Az 1-es index itt azt jelenti, hogy a képletek az első réteg felszínén érvényesek. ω jelöli a körfrekvenciát, μ a mágneses permeabilitást. A síkhullámú gerjesztésnél feltételezzük, hogy az (x, y, z) koordináta-rendszerben az elektromos tér x , a mágneses térerősség y tengely irányú. Az impedanciát egy, a rétegekre vonatkozó rekurziós képlettel lehet kiszámítani az n -edik réteg impedanciájából kiindulva, ahol n a rétegek száma

$$Z_n(\omega) = i\omega\mu_n/\gamma_n,$$

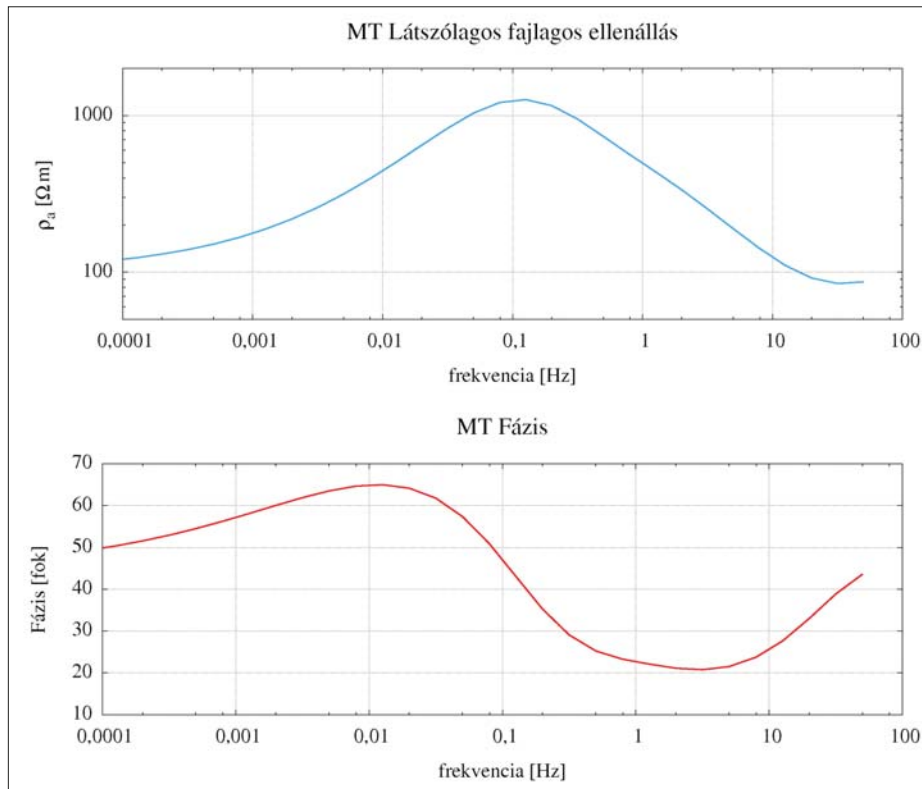
ahol $\gamma_j = \sqrt{i\omega\mu_j\sigma_j}$, σ_j a j -edik réteg vezetőképessége, μ_j a j -edik réteg mágneses permeabilitása,

$$Z_j(\omega) = \frac{i\omega\mu_j}{\gamma_j} \times \frac{(\gamma_j/i\omega\mu_j)Z_{j+1}(\omega) \coth(\gamma_j d_j) + 1}{(\gamma_j/i\omega\mu_j)Z_{j+1}(\omega) + \coth(\gamma_j d_j)}, \quad (6)$$

ahol d_j a j -edik réteg vastagsága. A (6) rekurziós képletet először Wait (1953) vezette le. Ennek most egy másik, tömörebb változatát elemezzük. Megemlítjük ugyanakkor, hogy számítástechnikai szempontból a rekurziós képleteknek az a változata kezelhető jobban, amelyiknél hiperbolikus függvények helyett exponenciális függvények szerepelnek

$$Z_j(\omega) = \frac{i\omega\mu_j}{\gamma_j} \coth\left(\gamma_j d_j + \coth^{-1}\left(\frac{\gamma_j}{i\omega\mu_j}\right)Z_{j+1}(\omega)\right). \quad (7)$$

A (7) képlet alapján megállapíthatjuk, hogy ha egy adott rétegben a három rétegparaméter (σ_j , d_j , μ_j) úgy változik, hogy a $\gamma_j d_j$ és a γ_j/μ_j mennyiségek nem változnak, akkor a



1. ábra | Magnetotellurikus görbék az ekvivalenciavizsgálathoz

Figure 1 | Magnetotelluric curves to the investigation of equivalence

rekurzió megfelelő iterációs lépése sem változik. Azok a modellek tehát, amelyekben egy adott j -edik rétegre $\gamma_j d_j$ és γ_j/μ_j megegyeznek, ekvivalensek, ezért az inverziótól sem várhatjuk el, hogy egyértelműen és egyenként határozza meg a σ_j , d_j és μ_j rétegpárparamétereket. Olyan szintetikus adatokkal vizsgáljuk az inverzió tulajdonságait, hogy az inverziót jellemző tulajdonságok, az ekvivalencia a lehető legjobban felismerhetők legyenek. Az 1. táblázat a) modellparamétereivel végzett számítás eredményei az 1. ábrán láthatók.

A táblázatban μ_{rel} a relatív mágneses permeabilitásra utal. A mágneses permeabilitás ilyen mértékű megnövekedése a Curie-hőmérséklet közelében képzelhető el, pl. magnetit esetében. Ennek a természetben előforduló mértéke a szakirodalomban vitatott (Ádám 2008), bár elméletileg végtelen nagy is lehet. Ebben a cikkben a mágneses permeabilitás meghatározhatóságát matematikai szempontból vizsgáljuk, így a százszoros megnövekedés kiválasztásának a tesztmodelleknél nincs különösebb jelentősége. Annak ellenére, hogy a második réteg fajlagos ellenállása ötöde az első és a harmadik réteg fajlagos ellenállásának, a réteg relatív mágneses permeabilitásának a százszoros megnövekedése azt eredményezi, hogy a látszólagos fajlagos ellenállás görbéjén egy olyan hatás jelentkezik, mintha a második rétegnek nagyobb lenne a fajlagos ellenállása. Az inverzió jellemzőit az ezekkel a modellparaméterekkel számított magneto-

tellurikus látszólagos fajlagosellenállás- és fázisértékek felhasználásával elemezzük. Ennél a példánál nem az volt a fő cél, amely az inverziók vizsgálatánál szokásos, hogy az inverzió miként adja vissza a helyes modellparamétereket, hanem csak az, hogy az 1. táblázatban szereplő a) értékekkel meghatározott modellnek matematikai szempontból milyen tulajdonságai vannak. Ezért egyetlen iterációs lépést számítottunk a helyes modellparaméterekből kiindulva annak érdekében, hogy megkapjuk a Jacobi-mátrixot. A Jacobi-mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásához tartozó sajátértékek, amelyek alapján a modell legfontosabb jellemzőire következtethetünk:

$$\lambda_1 = 5,80279, \lambda_2 = 4,83254, \lambda_3 = 3,30359, \lambda_4 = 1,54804, \lambda_5 = 0,54088, \lambda_6 = 0,00136, \lambda_7 = 0,00108, \lambda_8 = 0,00001.$$

Látható, hogy valójában 5 λ_j sajátérték különbözik 0-tól. A további három sajátértéknél nyilvánvalóan a számítástechnikai pontatlanság miatt jelenik meg egy elhanyagolhatóan kis érték. A Jacobi-mátrix szinguláris értékek szerinti felbontásából számítható a felbontóképességi mátrix (4). Abban az esetben, ha az inverzióval nem határozható meg külön-külön valamennyi rétegpárparaméter, akkor ez a mátrix megadja, hogy a rétegpárparamétereknek mely lineáris kombinációi határozhatók meg

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} 0,67 & 0,00 & 0,00 & -0,33 & 0,00 & 0,33 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,67 & 0,00 & 0,00 & -0,33 & 0,00 & 0,33 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 \\ -0,33 & 0,00 & 0,00 & 0,67 & 0,00 & 0,33 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & -0,33 & 0,00 & 0,00 & 0,67 & 0,00 & 0,33 & 0,00 \\ 0,33 & 0,00 & 0,00 & 0,33 & 0,00 & 0,67 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,33 & 0,00 & 0,00 & 0,33 & 0,00 & 0,67 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,50 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,50 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ d_1 \\ d_2 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

A (8) mátrixból látható, hogy az ugyanahhoz a réteghez tartozó modellparaméterek vannak szoros kapcsolatban. Vegyük figyelembe, hogy az inverziós algoritmus a modellparaméterek logaritmusával számol. Feltételezve, hogy az iterációs lépést egy jó illeszkedést biztosító modellen véghezvük, $j < n$ -re a j -edik réteg esetén egy iterációs lépés alkalmával a felbontóképesség mátrix j -edik sora azt jelenti, hogy a

$$(2/3) \Delta \log \rho_j - (1/3) \Delta \log d_j + (1/3) \Delta \log \mu_j = 0 \quad (9)$$

egyenlőség érvényes. A (9) egyenlet jobb oldalán azért szerepel 0, mert az (5) képletben $\Delta \mathbf{m}$ -et 0-nak vehetjük a feltételezett jó illeszkedés miatt. ρ_j itt a fajlagos ellenállást, a σ_j reciprokát jelenti. A $(j+n)$ -edik sor pedig a

$$-(1/3) \Delta \log \rho_j + (2/3) \Delta \log d_j + (1/3) \Delta \log \mu_j = 0 \quad (10)$$

egyenlőség teljesülését jelenti. Az \mathcal{R} mátrix $(j+2n-1)$ -edik sora a j -edik sor és a $(j+n)$ -edik sor összege, azaz a felbontóképességi mátrix egy rétegre vonatkozó három sora közül csak kettő független. Most megmutatjuk, hogy a (9) és a (10) képletek ekvivalensek azzal, hogy a direkt felada-

tot meghatározó rekurziós képletben $\gamma_j d_j$ és γ_j/μ_j azonos-sága esetén ugyanazt a modellezési eredményt kapjuk. Az inverzió k -adik iterációs lépése során érvényesek a

$$\rho_j^{(k+1)} = \rho_j^{(k)} \exp \{ \Delta \log \rho_j^{(k)} \}, \quad (11)$$

$$d_j^{(k+1)} = d_j^{(k)} \exp \{ \Delta \log d_j^{(k)} \}, \quad (12)$$

$$\mu_j^{(k+1)} = \mu_j^{(k)} \exp \{ \Delta \log \mu_j^{(k)} \} \quad (13)$$

képletek. A $\Delta \log \rho_j^{(k)}$, a $\Delta \log d_j^{(k)}$ és a $\Delta \log \mu_j^{(k)}$ mennyiségeket a (2) képlet határozza meg mint a $\Delta \mathbf{p}$ vektor komponenseit. A k felső index az iteráció sorszámát jelenti. Vizsgáljuk meg, hogy a $\Delta \log \rho_j^{(k)}$, a $\Delta \log d_j^{(k)}$ és a $\Delta \log \mu_j^{(k)}$ értékekre milyen feltétel adódik, ha elvárjuk a

$$\gamma_j^{(k)} d_j^{(k)} = \gamma_j^{(k+1)} d_j^{(k+1)}$$

egyenlőség teljesülését! γ_j -nek ρ_j -vel felírt alakját felhasználva és $\sqrt{i\omega}$ -val egyszerűsítve a

$$\sqrt{\frac{\mu_j^{(k)} \exp \{ \Delta \log \mu_j^{(k)} \}}{\rho_j^{(k)} \exp \{ \Delta \log \rho_j^{(k)} \}}} d_j^{(k)} \exp \{ \Delta \log d_j^{(k)} \} = \sqrt{\frac{\mu_j^{(k)}}{\rho_j^{(k)}}} d_j^{(k)} \quad (14)$$

2. táblázat | Modellparaméterek a magnetotellurikus adatok inverziójához, a) szintetikus adatok generálásához, b) a hagyományos MT inverzió eredménye, c) kezdeti modell a μ -t is figyelembe vevő inverzióhoz, d) a μ -t is figyelembe vevő inverzió eredménye

a)				b)			
réteg	ρ [Ω m]	d [m]	μ_{rel}	réteg	ρ [Ω m]	d [m]	μ_{rel}
1.	100	9000	1	1.	100,0	9000,1	
2.	100	500	100	2.	10000,9	50000,1	
3.	100		1	3.	100,0		

c)				d)			
réteg	ρ [Ω m]	d [m]	μ_{rel}	réteg	ρ [Ω m]	d [m]	μ_{rel}
1.	200	6000	1	1.	46,84	4215,72	2,1348
2.	200	1000	1	2.	739,43	3704,13	13,4989
3.	200		1	3.	141,46		0,7069

egyenlőséget kapjuk. Ebből adódik, hogy teljesülnie kell a

$$-(1/2) \Delta \log \rho_j + \Delta \log d_j + (1/2) \Delta \log \mu_j = 0 \quad (15)$$

egyenlőségnek, ahol már elhagytuk az iteráció sorszámát jelölő k -t. Ha ezt megszorozzuk $(2/3)$ -dal, akkor éppen a felbontóképességi mátrix $(j+n)$ -edik sorát kapjuk. Tekintsük most a rekurziós előremodellező képlet egy másik fontos mennyiségét, a γ_j/μ_j hányadost! (11), (12) és (13) alkalmazásával hasonlóan a $\gamma_j d_j$ mennyiséghez levezethető, hogy

$$\frac{\gamma_j^{(k)}}{\mu_j^{(k)}} = \frac{\gamma_j^{(k+1)}}{\mu_j^{(k+1)}}$$

akkor teljesül, ha

$$\Delta \log \rho_j + \Delta \log \mu_j = 0. \quad (16)$$

Ha (16) $(1/2)$ -éből kivonjuk (15) $(1/3)$ -át, akkor megkapjuk a felbontóképességi mátrix j -edik sorát (9). Az n -edik réteg esetében, ahol a rétegvastagság már nem játszik szerepet, a

$$\frac{\gamma_j^{(k)}}{\mu_j^{(k)}} = \frac{\gamma_j^{(k+1)}}{\mu_j^{(k+1)}}$$

feltételből közvetlenül következik a felbontóképességi mátrix n -edik és $(3n-1)$ -edik sora

$$(1/2) \Delta \log \rho_n + (1/2) \Delta \log \mu_n = 0.$$

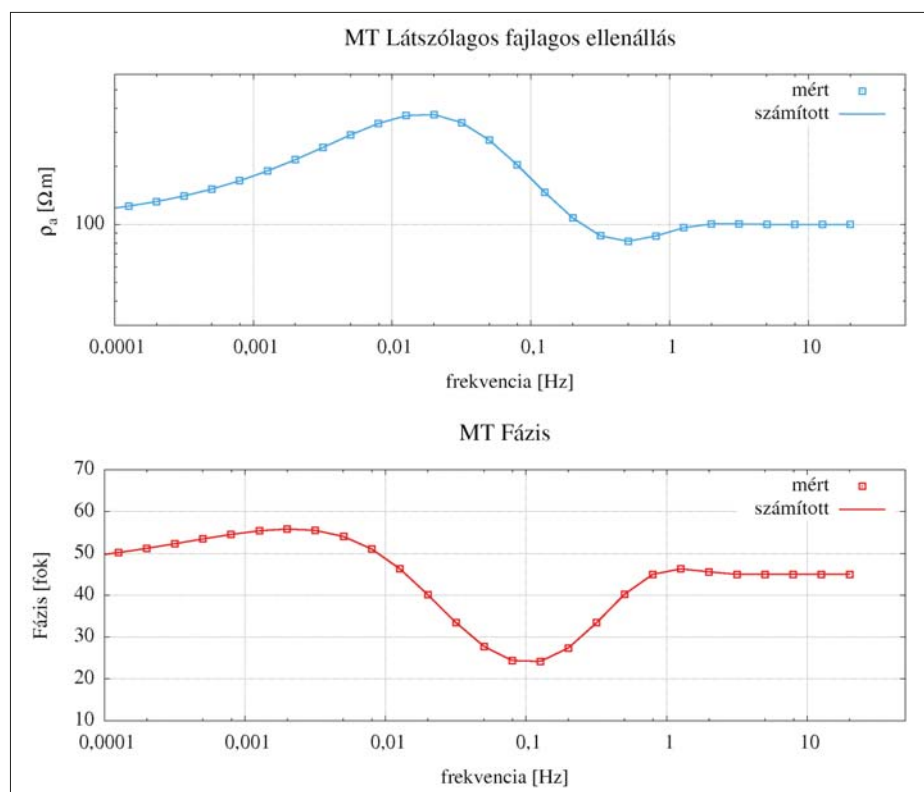
Ezzel a példával megmutattuk, hogy a rekurziós előremodellező képlet elemzése az ekvivalencia szempontjából ugyanazt az információt adja, mint a linearizált inverzió felbontóképességi mátrixa. Az eddig tett megállapítások alapján az sem zárható ki, hogy ha az inverziót a helyes rétegpáraméterekkel indítjuk, az iterációs lépések során az egyes rétegpáraméterek változnak, a helyes modellparaméterektől egyre távolabb kerülnek úgy, hogy a $\gamma_j d_j$ és a γ_j/μ_j mennyiségek változatlanok maradnak. A mérési adatok és a modellhez tartozó számított adatok eltérése viszont a számítástechnikai hibahatáron belül marad. Erre láthatunk egy példát az 1. táblázat b) modellparamétereivel. Ezeket a rétegpáramétereket a helyes modellből kiindulva kaptuk 200 iterációs lépés után. A modellparaméterek lassú eltávolodásának va-

lószerűleg az is az oka, hogy az inverzióban kis értékekkel ugyan, de azok a sajátértékek is szerepet kapnak, amelyeknek elméletileg 0-nak kellene lenniük. A paramétereknek ez a típusú megváltozása összhangban van a paraméterekre vonatkozó, a felbontóképességi mátrix által meghatározott összefüggésekkel is.

A következőekben elemezendő modell esetében elsősorban a mágneses permeabilitás nagyobb mélységben előforduló megváltozásával foglalkozunk. A modell három rétegének megegyezik a vezetőképessége. A szintetikus adatok számításához alkalmazott modellparamétereket a 2. táblázat a) adatai tartalmazzák.

Először a hagyományos, azaz a mágneses permeabilitással nem számoló inverziót alkalmazzuk, azaz az inverzió során azt feltételezzük, hogy mindegyik réteg mágneses permeabilitása a vákuumével egyezik meg annak ellenére, hogy a szintetikus adatok számításához használt modell esetében a második réteg mágneses permeabilitása a vákuuménak 100-szorosa. Az inverzió a 2. táblázat b) rétegpáramétereit adja eredményül. Az illeszkedés ebben az esetben tökéletes (2. ábra), pedig a második réteg fajlagos ellenállása 100-szorosára növekedett, tehát a mágneses permeabilitás hatásának a figyelmen kívül hagyása, amint az várható is volt, teljesen eltorzította a modellt. A következő kísérlet a mágneses permeabilitást is figyelembe vevő inverzió. Tekintettel arra, hogy ez az inverzió nagymértékben függ a kezdeti modelltől, megadjuk annak a paramétereit is (2. táblázat, c) paraméterek). Az inverzió eredményét a 2. táblázat d) paramétereit tartalmazzák.

Összhangban azzal a (7) képlet elemzésekor tett megállapításunkkal, hogy a síkhullámú gerjesztés esetén nem határozható meg a rétegezett modell valamennyi paramétere, a kapott modell meglehetősen távol van a szintetikus adatok generálására szolgáló modelltől. A szintetikus mérési adatok és az inverziós modellhez tartozó számított adatok illeszkedése viszont itt is tökéletes, megfelel a 2. ábrának. A 2. táblázat d) modelljéhez tartozó sajátértékek:



2. ábra A 2. táblázat b) és d) paramétereivel számított MT inverziós görbék illeszkedése

Figure 2 The fit of MT inversion curves calculated with the b) and d) parameters of Table 2

$\lambda_1 = 6,33228$, $\lambda_2 = 4,41243$, $\lambda_3 = 3,57432$, $\lambda_4 = 2,35852$,
 $\lambda_5 = 0,01114$, $\lambda_6 = 0,00289$, $\lambda_7 = 0,00001$, $\lambda_8 = 0,00001$.

Ezeknél a sajátértékeknél a legfeltűnőbb a λ_5 sajátérték viszonylag kis értéke. Mivel az előzőekben azt állítottuk, hogy háromréteges modell esetén 5 sajátérték különbözhet 0-tól, a λ_5 kis értéke magyarázatra szorul. A kapott modell első rétegének fajlagos ellenállása lényegesen kisebb, mint a második rétegé, így egy árnyékoló hatás érvényesül. Ezért a magnetotellurikus adatok a viszonylag rosszul vezető második réteg fajlagos ellenállásának a megváltozására csak kis mértékben lesznek érzékenyek, ennek megfelelően a megbízhatóan meghatározható rétegparaméterek száma 4-re csökkent.

Abban az esetben, amikor az inverziót az elvárt rétegparaméterekkel indítjuk, a rétegparaméterek fokozatosan, de

egyre távolabb kerülnek a helyes rétegparaméterektől. A modellparamétereket a 3. táblázat a) adatai tartalmazzák 200 iteráció után. Ezeket a rétegparamétereket érdemes összevetni az 1. táblázat b) rétegparamétereivel. A lényegesen vastagabb első réteg azt eredményezte, hogy az ekvivalenciafeltételek teljesülése mellett lényegében csak az első réteg paraméterei változtak, míg az 1. táblázat b) esetében a második réteg paraméterei is változtak. Tételezzük fel most, hogy a réteghatárookra vonatkozólag vannak előzetes információink, és végezzük el az inverziót úgy, hogy a rétegvastagságokat megadjuk, és nem engedjük meg, hogy az inverziós algoritmus változtassa azokat! Az így kapott inverziós paramétereket a 3. táblázat b) adatai adják. Az első és a második réteg fajlagos ellenállását és mágneses permeabilitását helyesen megkaptuk, a harmadik réteghez tartozó γ_3/μ_3 érték megegyezik a szintetikus adatok számí-

3. táblázat Inverziós eredmények a 2. táblázat a) modellparamétereivel számolt szintetikus adatokkal, a) a helyes rétegparaméterekből kiindulva, b) a rétegvastagságok rögzítésével

a)				b)			
réteg	ρ [Ωm]	d [m]	μ_{rel}	réteg	ρ [Ωm]	d [m]	μ_{rel}
1.	87,37	7593,18	1,1853	1.	100,01	9000,00	0,9999
2.	100,05	499,96	100,0080	2.	99,74	500,00	100,0040
3.	100,01		1,0000	3.	141,44		0,7070

tásához használt modellhez tartozó γ_3/μ_3 -mal, azaz, összhangban az előzőekben tett megállapításunkkal, az inverzió ezt a mennyiséget csak kismértékben változtatta.

Egydimenziós inverzió nem síkhullámú gerjesztésnél

Az egyszerűség kedvéért foglalkozunk a mágneses dipól gerjesztésű mérésekkel! A mért mennyiséget meghatározó képletek ugyanis ebben az esetben állnak a legközelebb a magnetotellurikus esethez. A függőleges mágneses dipól függőleges mágneses terét meghatározó képlet egy Hankel-transzformáció típusú integrál

$$H_z(\omega) = \frac{IS}{4\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) \lambda^2 e^{-\lambda(z+h)} [1 + R_0(\lambda)] d\lambda, \quad (17)$$

ahol J_0 az elsőfajú, nulladrendű Bessel-függvény, IS a mágneses dipól momentuma, r az adó–vevő távolság, h és z az adó, illetve a vevő magassága. Az integrál jobb konvergenciájának az érdekében egy kis h vagy z érték megadása még a felszínen levő mérési rendszer esetén is célszerű. A rétegparaméterektől függő $R_0(\lambda)$ magfüggvény rekurzióval határozható meg. A rekurziónak többféle, ekvivalens változata létezik, most egy olyat választunk, amelyik a legjobban hasonlít a magnetotellurikus esetre (7):

$$1 + R_0(\lambda) = 2\lambda \left[\lambda + \frac{\lambda_1 \mu_0}{S_1(\lambda) \mu_1} \right]^{-1}. \quad (18)$$

A rekurziót az $S_0(\lambda)$ függvényre írjuk fel:

$$S_j(\lambda) = \coth \left(\lambda_j d_j + \coth^{-1} \left(\frac{\lambda_j \mu_{j+1}}{\lambda_{j+1} \mu_j} S_{j+1}(\lambda) \right) \right). \quad (19)$$

Ez a rekurzió formailag hasonlít a magnetotellurikus (7) képletre. A (19) képlet ugyanolyan, mint amelyet Kaufman (1994) könyvében közöl, azzal az eltéréssel, hogy ott a μ mágneses permeabilitás mindegyik rétegben ugyanaz. A (7) és (19) között a legfontosabb eltérés az, hogy (19)-ben γ_j helyett a $\lambda_j = [\lambda^2 + \gamma_j^2]^{1/2}$ érték szerepel. Mivel λ értéke a

$(0, \infty)$ intervallumban bármely értéket felvesz, nem végezhetők el azok az egyszerűsítések, amelyek a síkhullámú esetben megtehetők, ezért nem lehet egyszerű ekvivalenciakifejezéseket megadni a rétegparaméterekre (ρ_j , d_j , μ_j) vonatkozólag. Ezért remény van arra, hogy az egydimenziós inverzióval valamennyi rétegparaméter meghatározható. A szintetikus adatok generálásához tételezzük fel, hogy az adó egy függőleges mágneses dipól, és attól r távolságra mérjük a mágneses térerősség függőleges komponensének a képzetes részét, $\text{Im}(H_z(\omega))$ -t különböző frekvenciájú gerjesztésekkel. A modellparaméterek ugyanazok, mint az első magnetotellurikus példánál (4. táblázat, a) paraméterek).

Először egy szintetikus adatokon végzett olyan inverziót tekintünk, ahol csak egyetlen $r = 2500$ m adó–vevő távolsággal végeztünk frekvenciaszondázást. Az inverzió kezdeti modelljét a 4. táblázat b) adatai tartalmazzák. Az inverzió eredményeként kapott c) modellparamétereket a 4. táblázat tartalmazza 200 iteráció után. A táblázat alapján megállapítható, hogy az inverzió lassan ugyan, de a megfelelő modellparaméterekhez konvergál. Ez lényeges különbség a síkhullámú esethez képest, mivel ott a helyes rétegparaméterekkel indítva az inverziót a paraméterek lassan távolodnak a helyes értékektől. Az $\text{Im}(H_z(\omega))$ illeszkedése a 3. ábrán látható. Az ábrával kapcsolatban azt kell megjegyezni, hogy az adatok a vákuumbeli értékre normálva vannak, és a függőleges tengely nem logaritmikus, mivel az ábrázolt mennyiségek 0-hoz közeli értékeket is felvehetnek. Az egy r értékkel végzett méréseken alapuló inverzió is megmutatja, hogy a nem síkhullámú gerjesztés a nyolc rétegparaméter meghatározhatóságának szempontjából lényegesen kedvezőbb, mint a magnetotellurikus módszer.

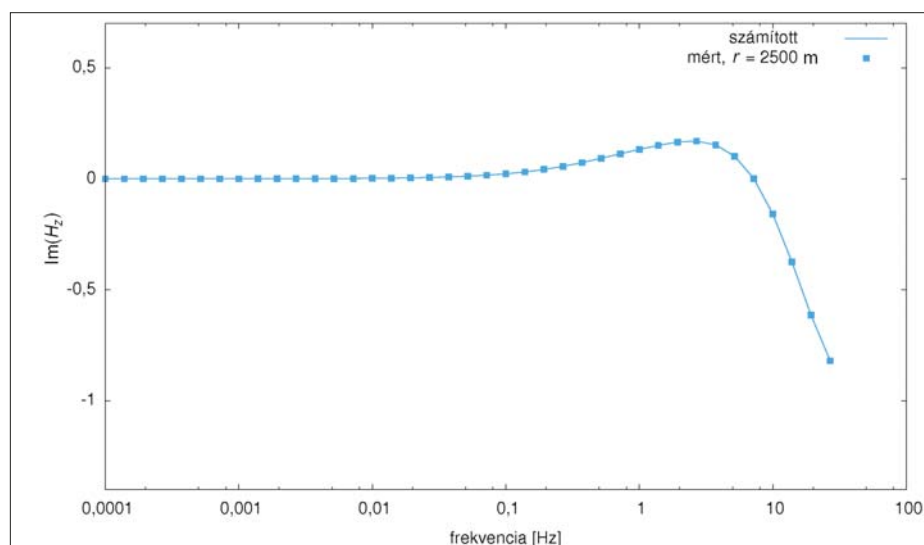
Az 5. táblázat 2. oszlopa tartalmazza az $r = 2500$ m értékkel végzett mérések inverziójához tartozó sajátértékeket. A sajátértékek itt is csökkennek, de az a fajta ugrásszerű csökkenés, amely a magnetotellurikus esetet jellemezte az 5. sajátérték után itt nem jelentkezik.

A következő kísérlet a két adó–vevő távolsággal ($r = 2500$ m és $r = 4000$ m) mért szintetikus adatokon elvégzett inverzió. A szintetikus adatok generálására szolgáló modell

4. táblázat | Modellparaméterek mágneses dipól gerjesztésű mérések inverziójához, a) generáló modell, b) kezdeti modell, c) az inverzió eredménye $r = 2500$ m-rel végzett méréseknél

a)				b)			
réteg	ρ [Ω m]	d [m]	μ_{rel}	réteg	ρ [Ω m]	d [m]	μ_{rel}
1.	100	1000	1	1.	120,0	1500,0	1,0
2.	20	500	100	2.	40,0	400,0	50,0
3.	100		1	3.	120,0		1,0

c)			
réteg	ρ [Ω m]	d [m]	μ_{rel}
1.	101,58	1005,21	1,024
2.	27,59	678,05	73,342
3.	109,59		1,071



3. ábra A mért és számított értékek ($\text{Im}H_z(\omega)$) illeszkedése mágneses dipól gerjesztésű mérésre egy adó–vevő távolsággal

Figure 3 The fit of the calculated and measured values ($\text{Im}H_z(\omega)$) for measurement with magnetic dipole excitation with one transmitter–receiver separation

5. táblázat Az inverzió sajátértékei mágnesesdipól-gerjesztés esetén az adó vevő távolságok számának függvényében

Index	1 db r érték	2 db r érték	7 db r érték
1	412,75113	415,04578	415,25110
2	1,47099	10,21085	25,81511
3	1,52276	4,90454	12,59127
4	0,54295	2,51982	10,72603
5	0,36770	0,99047	3,06328
6	0,12302	0,64518	2,18058
7	0,03319	0,11472	0,61311
8	0,01101	0,02529	0,10704

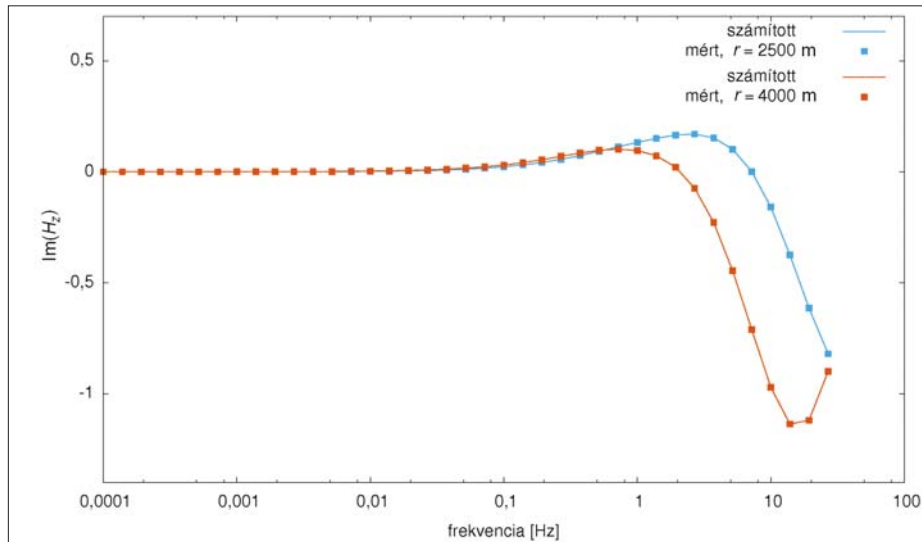
és az inverzió kezdeti modellje ugyanaz, mint az előző példánál (4. táblázat, a) és b) paraméterek). A 200 iterációs lépés után kapott inverziós modellparamétereket a 6. táblázat a) adatai mutatják. Ezek egyértelműen közelebb vannak az eredeti paraméterekhez, mint a 4. táblázat c) paraméterei. A mérési és a modellhez tartozó számított adatok a 4. ábrán láthatók. A modellhez tartozó sajátértékek az 5. táblázat

harmadik oszlopában szerepelnek. A javulás az egy r távolsággal végzett méréssel szemben nyilvánvaló, a legkisebb sajátértékek nagyobb értéket vettek fel.

Végül szintetikus adatokkal arra az inverzióra is mutatunk példát, amikor 7 db különböző adó–vevő távolsággal mérünk ($r = 2500$ m, 3000 m, 3500 m, 4000 m, 4500 m, 5000 m, 5500 m). Az inverzió eredményeként kapott modell paramétereit a 6. táblázat b) adatai tartalmazzák. Az iterációk száma most is 200 volt, de meg kell jegyezni, hogy szemben a két előző példával a rétegparaméterek már a 100-adik iteráció után elérték a táblázatban szereplő értékeket, és ezután lényegében nem változtak. Az inverzió sajátértékei az 5. táblázat 4. oszlopában láthatók. Látszik, hogy a sajátértékek nagysága a 7 különböző adó–vevő távolsággal végzett mérések esetén, amint az várható is volt, itt a legkedvezőbb. A mágneses dipól gerjesztésű mérések inverziójához tartozó sajátértékek esetében egy másik fontos eltérés a síkhullámú esethez képest az, hogy az első sajátérték lényegesen nagyobb, mint a többi. Ennek nyilvánvalóan az az oka, hogy az adó közvetlenül a felszínen van, ezért az első réteg mérési adatokra gyakorolt hatása lényegesen felülmúlja a többi réteg hatását.

6. táblázat Inverziós eredmények, a) 2 adó–vevő távolsággal, b) 7 adó–vevő távolsággal

a)				b)			
réteg	ρ [Ωm]	d [m]	μ_{rel}	réteg	ρ [Ωm]	d [m]	μ_{rel}
1.	100,041	1000,144	1,0006	1.	100,021	1000,112	1,0003
2.	20,270	506,521	98,7344	2.	20,089	502,010	99,5849
3.	100,125		1,0012	3.	100,082		1,0007



4. ábra | Mágneses dipól gerjesztésű mérések inverziós görbéinek az illeszkedése 2 adó–vívő távolsággal
Figure 4 | The fit of inversion curves of measurements by magnetic dipole excitation with 2 transmitter–receiver separations

A sajátértékek és az inverziós modellparaméterek értékei a mágnesesdipól-gerjesztésnél egyértelműen kedvezőbbek, mint a síkhullámú gerjesztésnél. A magnetotellurikus esethez képest az 5. és a 6. sajátérték aránya a mágnesesdipól-gerjesztés mellett lényegesen jobb. A magnetotellurika esetén $\lambda_5/\lambda_6 = 397,7$, amely két nagyságrenddel nagyobb, mint a mágnesesdipól-gerjesztéshez tartozó $\lambda_5/\lambda_6 = 1,405$. Az eddigi példák alapján megállapítottuk, hogy mágnesdipól-gerjesztéssel a háromréteges modellnek mind a nyolc ré-

tegparamétere meghatározható, és a legkisebb sajátértékek a síkhullámú gerjesztéstől eltérően nem csak számítástechnikai pontatlanságként jelennek meg. Ennek ellenére a kis értékű sajátértékeknek is van információtartalmuk. Hagyjuk el például a legkisebb, nyolcadik sajátértéket, és számítsuk ki a felbontóképesség mátrixot 7 sajátérték felhasználásával, amiből megállapítható, hogy az inverzió által meghatározott paraméterekre milyen bizonytalanság jellemző

$$\mathcal{R} = \begin{pmatrix} 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,66 & -0,01 & 0,00 & -0,34 & 0,00 & 0,33 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,01 & 0,00 & 1,00 & 0,01 & 0,00 & -0,01 & 0,00 \\ 0,00 & -0,34 & 0,00 & 0,01 & 0,66 & 0,00 & 0,33 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,33 & 0,00 & -0,01 & 0,33 & 0,00 & 0,69 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 1,00 \end{pmatrix} \begin{matrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ d_1 \\ d_2 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{matrix} \quad (20)$$

Ebből a mátrixból a második réteg paramétereire (ρ_2 , d_2 , μ_2) ugyanolyan ekvivalenciatulajdonságok állapíthatók meg, mint a síkhullámú esetben. Ismét kihangsúlyozzuk a különbséget, azaz itt a nyolcadik sajátérték kicsi ugyan, de 0-tól egyértelműen különbözik. Ha ezt a legkisebb sajátértéket is figyelembe vesszük a sajátérték számításakor, akkor az egységmátrixot kapjuk, ami azt jelenti, hogy valamennyi rétegparaméter meghatározható. A megállapításaink szintetikus, zajmentes adatokra vonatkoznak, zajjal terhelt adatok esetében már elképzelhető, hogy nem oldható fel a modelleknek ez a típusú ekvivalenciája. A (20) mátrixszal jellemzett ekvivalencia gyakran előfordul frekvenciaszondázásoknál és tranziens elektromágneses méréseknél, amikor egy viszonylag vékony, de a környezetéhez

képest jól vezető rétegről van szó. Szintetikus adatokon végzett inverzióval megmutatható, hogy azokra a mérésekre is jellemző, hogy a jól vezető, vékony rétegek paramétereire (σ_j , d_j) csak rendkívül lassú konvergenciával határozható meg.

Összefoglalás

Szintetikus adatokkal megmutattuk, hogy síkhullámú gerjesztés esetén a felbontóképességi mátrix megadja, hogy mely rétegparaméterek között van lineáris kapcsolat. Ez az információ teljesen ekvivalens az előremodellező képlet rekurziós formulájából adódó összefüggésekkel. Más szóval, ha az egydimenziós modell esetében a mágneses permea-

bilitás hatásával is számolunk, a magnetotellurikus inverzió nem oldható meg egyértelműen. A nem síkhullámú gerjesztés esetére a képletek alapján nem lehet a síkhullámú gerjesztéshez hasonlóan bizonyítani az ekvivalenciát. Ezért itt az inverziós algoritmus Jacobi-mátrixának a szinguláris értékek szerinti felbontásából adódó sajátértékei és a felbontóképességi mátrix tulajdonságai alapján vonjuk le azt a következtetést, hogy elméletileg lehetséges mindegyik rétegparaméter meghatározása. Fontos különbség továbbá a kétféle gerjesztés között, hogy síkhullámú gerjesztésnél az inverzió a helyes rétegparaméterekkel indítva sem bizonyult stabilnak, míg a mágnesesdipól-gerjesztés esetén az inverzió a helyes értékekhez közeli rétegparaméterekkel indítva a helyeshez egyre közelebbi értékeket adott, bár a konvergencia meglehetősen lassú volt.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett inverziós vizsgálatok az OTKA 68475 projekt keretében készültek.

Hivatkozások

- Ádám A., 2008: Keressük a Hopkinson-hatást, azaz a Curie hőmérséklet közelében történő jelentős szuszceptibilitás-növekedést a Pannon-medencében. *Magyar Geofizika* 49, 68–74
- Jackson D. D., 1972: Interpretation of Inaccurate, Insufficient and Inconsistent Data. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 28, 97–109
- Kaufman A. A., 1994: *Geophysical Field Theory and Method. Part C, Electromagnetic Fields II.* Academic Press, Inc.
- Kiss J., Szarka L., Prácsér E., 2005: Second-order magnetic phase transition in the Earth, *Geophys. Res. Lett.* 32, L24310
- Tarantola A., 1987: *Inverse Problem Theory.* Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo
- Wait J. R., 1953: Induction by a horizontal oscillating magnetic dipole over a conductive homogeneous earth. *Trans. Am. Geophys. Union* 34, 185–188
- Zhang Z., Oldenburg D. W., 1997: Recovering magnetic susceptibility from electromagnetic data over one-dimensional earth. *Geophys. J. Int.* 130, 422–434
- Zhang Z., Oldenburg D. W., 1999: Simultaneous reconstruction of 1-D susceptibility and conductivity from electromagnetic data. *Geophysics* 64/1, 33–47

Sorfejtéses inverzió V. Gyors 2D geoelektromos inverziós módszer

GYULAI ÁKOS¹, ORMOS TAMÁS¹, DOBRÓKA MIHÁLY^{1,2}

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²MTA–ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

Jelen dolgozat egy cikksorozat része, amelyben a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kifejlesztett sorfejtéses inverziós módszeren alapuló adatfeldolgozási/értelmezési eljárásokat mutatjuk be. Az első dolgozatban a Fourier-transzformációt újszerű megközelítésben inverz feladatként tárgyaltuk úgy, hogy a frekvenciaspektrumot sorfejtéssel közelítettük, inverziós változónak a sorfejtési együtthatókat tekintve. A második dolgozatban a sorfejtéses inverzió módszerét a mélyfúrási geofizikai adatok feldolgozására vonatkozólag alkalmaztuk úgy, hogy a petrofizikai paramétereket – mint a mélység függvényeit – sorfejtéssel közelítettük, a sorfejtési együtthatókat az inverziós eljárás keretében állítottuk elő. A harmadik dolgozatban a sorfejtéses inverzió módszerével a gerjesztettpotenciál- (GP-) adatok feldolgozására mutattunk be új módszert. A negyedik dolgozatban a ME Geofizikai Tanszék és a BMGE Általános és Felsőgeodézia Tanszék együttműködése keretében korábban kidolgozott 2D eljárás továbbfejlesztésével bemutattuk a nehézségi erőter háromdimenziós potenciálfüggvényének inverziós előállítását Eötvös-inga-mérési adatok, nehézségi gyorsulási mérések, függővonal-elhajlásértékek és digitális terepmodelladatok együttes felhasználásával. A jelen dolgozatban 2D földtani szerkezeteken mért geoelektromos adatok inverziójára mutatunk be új, hatékony eljárást. A módszer lényege a korábbiakhoz hasonló: a földtani szerkezet vertikális és laterális koordinátáktól függő rétegvastagság és fajlagos ellenállás függvényeit sorfejtéses formában diszkrétizáljuk, és az inverz feladatot a sorfejtési együtthatókra fogalmazzuk meg. A 2D modell sorfejtéssel történő diszkrétizációja révén csökkenthetjük a modellparaméterek (sorfejtési együtthatók) számát, így jelentősen túlhatározott inverz feladatot kapunk, amely további regularizációs feltételek nélkül megoldható. A sorfejtési együtthatók ismeretében a lokális rétegparamétereket a szelvény mentén pontról pontra számíthatjuk.

Gyulai, Á., Ormos, T., Dobróka, M.: Series expansion based inversion V. A quick 2D geoelectric inversion method

The present study is a part of a series of articles in which data processing/interpretation methods are presented based on series expansion inverse technique developed by the Department of Geophysics, University of Miskolc. In the first paper the Fourier transform was discussed in a new approach as an inverse problem so that the frequency spectrum was approximated by series expansion and the inversion variables were regarded as series expansion coefficients. In the second article the series expansion inverse method was applied for borehole geophysical data processing so that the petrophysical parameters – such as functions of depth – were approximated by series expansion, the series expansion coefficients were produced within the confines of the inversion method. A new method which processes induced potential (IP) data by series expansion inversion method was presented in the third paper. In the fourth paper we developed the former 2D solution which was elaborated by the cooperation between the Department of Geophysics, MU and the Department of Geodesy and Surveying, BUTE, and an inversion reconstruction of 3D gravity potential was presented which was based not only on the torsion balance and gravity measurements, but also on the deflections of the vertical and digital terrain model data. Now as a continuation, this paper presents the principles of a new inversion method used for determining 2D geological structures. The basis of the method is that horizontal changes in layer-thicknesses and resistivities of the geological structure are discretized in the form of series expansion. The unknown expansion coefficients are determined by linearized iterative least-squares (LSQ) inversion of data provided by surface geoelectric measurements. The discretization of the 2D model by means of series expansion allows to reduce the number of model parameters. Thus, the resulting inverse problem becomes overdetermined and can be solved without the application of additional regularization, e.g., by smoothness constraints, which is usually required for traditional 2D/3D inversion. By knowing the expansion coefficients, the local layer parameters are calculated along the profile, point by point.

Beérkezett: 2011. február 20.; *elfogadva:* 2011. február 27.

Bevezetés

A 2D és 3D földtani szerkezetek kutatásakor a mérési-kiértékelési módszereknek két különböző típusa használatos a geoelektromos mérések (szondázás) gyakorlatában.

Laterálisan „lassan” változó modellek esetén az ún. hagyományos vertikális elektromos szondázási (VESZ) mérések jól alkalmazhatók. A modellt leíró lokális rétegeparamétereket gyakran olyan látszólagos fajlagosellenállás-adatokból becsülik (szondázási görbék), melyeket viszonylag nagy állomásközzel (50–200 m) és egyedi 1D inverziós módszerekkel határoznak meg (Koefoed 1979). Azért, hogy a lehető legjobb közelítést érjük el, a mérőelektroda elrendezésének a földtani szerkezet dőlésirányába kell esnie. Ezután a lokális rétegeparaméterek interpolációjával határozzuk meg a geológiai szerkezetet. Az egyedi inverzió során három- vagy többretegű modell esetén fellépő ekvivalencia gyakran olyan nagy bizonytalanságot okoz a paraméterbecslésben, mely a gyakorlatban nem elfogadható. Ezt a problémát jelentősen csökkenthetjük együttes inverziós módszerek alkalmazásával (Vozoff, Jupp 1975, Hering et al. 1995, Haber, Oldenburg 1997, Misiek et al. 1997, Kis 1998, Szabó 2004, Gallardo, Meju 2004). Annak érdekében, hogy jobb közelítést kapjunk laterálisan lassan változó földtani szerkezetek esetére, új inverziós algoritmust, az ún. 1,5D inverziót vezette be Gyulai és Ormos (1999a). Ez a módszer a szelvény mentén minden egyes VESZ állomáson mért összes adatot egyetlen inverziós eljárásban egyesíti. A modellparaméterek laterális változását (a rétegek fajlagos ellenállásának és vastagságának a laterális koordinátáktól való függését) sorfejtéssel közelítik. Költséghatékony számítás biztosítása érdekében a szerzők 1D előremodellezést használtak. A 1,5D módszer hatékonyságát mind szintetikus, mind terepi adatokon bemutatták (Gyulai, Ormos 1997, 1998, 1999a, 1999b).

2D vagy 3D inverz feladatok előremodellezésének FD módszerrel történő megoldásakor egy négyzethálós rácspontjaiban definiált, szakaszonként állandó ellenállásértékeket feltételeznek, melyek az inverziós eljárás ismeretlenjei. Ez a megközelítés – a mérési adatok számát messze meghaladó számú – ismeretlen eredményez, mely alulhatározott inverz feladathoz vezet. Ismeretes, hogy az alulhatározott inverz feladatnak egyértelmű megoldása érdekében további megkötéseket kell alkalmaznunk. Ezek a megkötések biztosíthatják a megoldás simaságát (Marquardt–Levenberg-módszer) vagy akár egy réteghatár meglétére fókuszálhatnak (Blaschek et al. 2008). Az alulhatározott inverziós algoritmusokat különböző kényszerfeltételekkel stabilizáljuk, azonban a nem fizikai alapokon nyugvó járulékos kikötések komolyan befolyásolhatják az inverziós eredményeket.

A feladatok többértelműségének csökkentése és gyorsabb program megvalósítása érdekében több szerző kombinálta már a 2D és 1D számításokat (pl. Christiansen, Auken 2004). Auken et al. (2005) 1D-s előremodellezéssel működő, „laterálisan kényszerített” inverziós módszert mutatott be nagyon nagy adatrendszerek feldolgozására és értelmezésére. A lokális 1D modelleket laterálisan kapcsolták össze

úgy, hogy a szomszédos paraméterek (tipikusan fajlagos ellenállás és mélység) között hozzávetőleges azonosságot írtak elő meghatározott intervallumon belül (Auken, Christiansen 2004).

Jelen cikkben alternatívát ajánlunk a többértelműség csökkentésére, mely velejárója a hagyományos 2D inverziós sémáknak. Továbbfejlesztve a 1,5D inverziós eljárást az előremodellezési számításokhoz a Spitzer (1995) által kidolgozott FD algoritmust használjuk. Az eljárás lényeges részeként a 2D geoelektromos földtani modell parametrizálását továbbra is a rétegvastagság- és a fajlagosellenállás-értékek sorba fejtésével végezzük és a sorfejtési együtthatókat az inverziós probléma ismeretlenjeiként definiáljuk. Ezáltal – a hagyományos véges differenciás (FD) vagy véges elemes eljárás (FEM) alapú inverziós módszerekhez képest – az ismeretlenek száma jelentősen csökkenthető, ami az inverz feladat túlhatározottságát eredményezi további önkényes (regularizációs vagy simasági) kikötés nélkül is. A rövidebb számítási idő elérése érdekében a 1,5D módszert (Gyulai és Ormos 1999a) használjuk az első néhány iterációs lépésben, majd annak eredményeit kezdeti modellként használjuk az ezt követő (2D előremodellezésre épített) inverzióban. Ezt a módszert kombinált geoelektromos inverzióknak (CGI = *Combined Geoelectric Inversion*) nevezzük.

A sorfejtéses inverzió módszerét mutatta be akadémiai doktori értekezésében vezetett hullám szeizmikus adatok feldolgozására Dobróka (1994) (a 2D szeizmikus vezetett hullám direkt feladatát WKBJ közelítésben kezelve). Szeizmikus refrakciós inverz probléma megoldására Ormos (2002), majd Ormos és Daragó (2005) sorfejtéses inverziós eljárást dolgozott ki. Ezekben a dolgozatokban a modell laterális változásait sorfejtéssel diszkrétizálták, az inverziós problémát pedig sorfejtési együtthatókra fogalmazták meg.

Sorfejtéses geoelektromos inverzió

A CGI módszer első fázisában a 1,5D inverziót megfelelő startmodell felállítására használjuk, ezért kiindulópontként egy rövid áttekintést nyújtunk a 1,5D módszerről, mert ennek is a modellparaméterek sorfejtése az alapja. A linearizált CGI algoritmus a Gauss-féle legkisebb négyzetek módszerét (LSQ) használja a sorfejtési együtthatók becslésére.

A 1,5D geoelektromos inverziós módszer

Ahogy azt a bevezetésben már említettük, a 1,5D inverziós módszert a hagyományos VESZ mérések értelmezésére fejlesztették ki (Gyulai, Ormos 1997, 1998, 1999a). A módszert alkalmazva a 2D földtani modell laterális változásait sorfejtéssel írjuk le alkalmasan választott bázisfüggvények segítségével. Ebben az iteratív inverziós algoritmusban 1D előremodellezést alkalmazunk. A sorfejtési együtthatók az inverziós problémában ismeretlenekként szerepelnek.

Amint azt Gyulai és Ormos (1999a) is leírta, a sorfejtési együtthatókat együttesen lehet meghatározni a szelvény menti összes VESZ mérés adataiból. Ebben a megközelítés-

ben a sorfejtési együtthatók (melyek a teljes szelvény mentén megegyeznek) az előremodellezés során használt különböző 1D modelleket kapcsolják össze. A szintetikus és terepi adatokon végzett korábbi vizsgálataink megmutatták, hogy a 1,5D inverziós eljárás pontos és megbízható paraméterbecslést ad, és – az 1D előremodellezés ellenére – az eredmények igen gyakran elfogadhatóak a terepi gyakorlatban (Gyulai, Ormos 1999a, Gyulai et al. 2000, Gyulai 2001).

Korábbi geoelektromos kutatások (Gyulai, Ormos 1997, 1998, 1999a, Kis et al. 1998) bemutatták az 1,5D inverziós módszer néhány előnyét, úgymint számítási sebesség, pontosság, stabilitás stb. Ezeknek az eredményeknek alapján Kis (1998) általánosította a 1,5D inverziós eljárást más típusú bázisfüggvények használatával, és tanulmányozta az ekvivalenciaprobléma felbontására gyakorolt hatását.

A 1,5D közelítő inverzióban a sorfejtéses módszert a modellparaméterek laterális változásainak leírására alkalmazzuk. Feltételezzük, hogy a laterálisan változó modellparaméterek Fourier-sorfejtéssel megfelelő pontossággal közelíthetők (Gyulai, Ormos 1999a):

$$\rho_n(s) = \frac{1}{2}d_n + \sum_{k=1}^{K_n} d_{nk} \cos k \frac{2\pi s}{S} + \sum_{k=1}^{K_n} d_{nk}^* \sin k \frac{2\pi s}{S_p}, \quad (1)$$

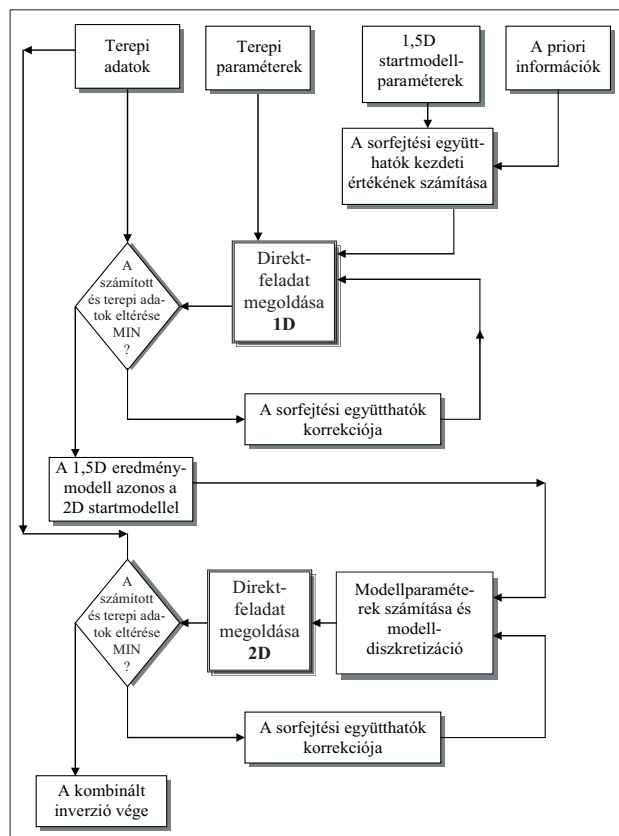
ahol $n = 1, \dots, N$,

$$h_n(s) = \frac{1}{2}c_n + \sum_{l=1}^{L_n} c_{nl} \cos l \frac{2\pi s}{S} + \sum_{l=1}^{L_n} c_{nl}^* \sin l \frac{2\pi s}{S_p}, \quad (2)$$

ahol $n = 1, \dots, N-1$, valamint $\rho_n(s)$ az n -ik réteg ellenállásfüggvénye, $h_n(s)$ az n -ik réteg vastagságfüggvénye és d_{nk} , d_{nk}^* , c_{nl} , c_{nl}^* jelölik a sorfejtési együtthatókat. N a rétegek száma és s az S_p hosszúságú szelvény menti laterális koordináta. K_n és L_n maximális értékeit a VESZ pontok alapján lehet meghatározni, ahogy azt Gyulai és Ormos (1999a) is leírta. Az inverziós módszer alkalmas a legtöbb elektróda elrendezésben (Wenner, dipól–dipól, pole–pole) mért adatok értelmezésére és kényszerített inverzióként is kezelhetjük (Auken et al. 2005, 2006, Pellerin, Wannamaker 2005). Ebben az értelemben a megkötés a különböző adatrendszer közötti csatolás lesz, köszönhetően annak, hogy a sorfejtési együtthatók minden számított adatra azonosak lesznek.

A kombinált geoelektromos inverziós módszer

Ahhoz, hogy pontosabb eredményeket kapjunk gyorsan változó 2D földtani szerkezetek esetén, pontos előremodellezés alkalmazására van szükség a 2D inverzió során. A 1,5D inverziót ezért továbbfejlesztettük, mivel az 1D előremodellezés gyorsan változó modelleknél elégtelen pontosságú becslést ad. Ebben az új, linearizált CGI inverziós algoritmusban a 1,5D inverziós módszerrel egy startmodellt számítunk (első fázis), ami azt jelenti, hogy az első iterációkban 1D előremodellezést alkalmazunk. Az ezután következő iterációkban (második fázis) a lassúbb, de pontosabb 2D előremodellező FD algoritmust (Spitzer 1995) használjuk az elméleti adatok és a Jacobi-mátrix elemeinek számítására. A Spitzer által kifejlesztett FD előremodellezési eljárást



1. ábra Az együttes inverziós módszer algoritmusának és folyamat-ábrája

Figure 1 Algorithm and flow chart of combined inversion method (CGI)

3D számításokra tervezték. 2D vizsgálatban való alkalmazása során a számítási idő növekedését tapasztalhatjuk. Annak ellenére, hogy ismertek gyorsabb módszerek is, a Spitzer-féle eljárását alkalmaztuk azért, hogy megkönnyítsük a programozási feladatokat, ha később kutatásainkat 3D földmodellekre is kiterjesztjük. A CGI eljárásban a sorfejtési együtthatók ismeretlen modellparaméterekként vesznek részt (1. ábra).

Sorfejtéskor a rétegvastagság- és ellenállásértékeket a laterális koordináták folytonos függvényeként fejezzük ki, ezért ezeket a mennyiségeket tetszőleges helyen számíthatjuk. Az FD modellezés (Spitzer 1995) szakaszonként állandó ellenállásértékeket feltételez, melyeket négyzethálón definiálunk. A sorfejtéssel előállított modellparaméterek rácsra történő leképezésére mindegyik direkt feladat számításnál szükség van. Ugyanis mindegyik VESZ állomáshoz „egyedi” rácsalót kell használni, melynek osztásköze az elektródaközöknek és az elvárt modell felbontásának megfelelően mind horizontális, mind vertikális irányban logaritmikus léptékű. A rácsponthoz a fajlagos ellenállás-értékek az adott réteg fajlagos ellenállás-értékeinek sorfejtésével határozhatók meg, ráadásul abban az esetben, ha a rácsponthoz a réteg közeli szomszédságában helyezkednek el, súlyozást alkalmazunk. A CGI eljárás alap gondolatát így részletezhetjük:

- az első fázisban 1,5D közelítéssel gyorsan előállítunk egy modellt, melyet a későbbi 2D inverziós eljárások kezdeti modelljének tekinthetünk
- a második fázisban 2D előremodellezéssel számítjuk ki az elméleti adatokat és a Jacobi-mátrix elemeit. A kezdeti modell (lásd az első fázisban) általában elég közel van a megoldáshoz, így csupán néhány további 2D iterációs lépés elegendő egy elfogadható paraméterbecsléshez a második fázisban. A sorfejtéses módszer nagy előnye, hogy az ismeretlenek száma a mért adatokhoz képest sokkal kisebb, s ez biztosítja az inverz feladat túlhatározottságát. Így elkerülhetjük a további, nem fizikai kikötések használatát.

Az inverziós eredmény pontosságának leírására különböző mennyiségeket használhatunk. Az adattérben az L_2 normát alkalmazva a normált d adattávolságot az alábbiak szerint definiáljuk:

$$d = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(\frac{\rho_{a,i}^{(\text{mért})} - \rho_{a,i}^{(\text{számított})}}{\rho_{a,i}^{(\text{számított})}} \right)^2} \times 100\%, \quad (3a)$$

ahol I jelöli a $\rho_{a,i}$ mért vagy számított látszólagos fajlagos-ellenállás-értékek számát. Ismert modellen számított szintetikus adatok inverziója esetén ($\mathbf{m}^{(\text{egzak})}$ paraméterekkel) a relatív modelltávolságot is lényeges számolni:

$$D = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q \left(\frac{m_q^{(\text{becsült})} - m_q^{(\text{egzak})}}{m_q^{(\text{egzak})}} \right)^2} \times 100\%, \quad (3b)$$

ahol Q a modellparaméterek számát jelöli.

A paraméterbecslés pontosságát általában a varianciával jellemzik, melyet a paraméterek kovarianciamátrixának főátlóbeli elemeiből származtatunk (Menke 1984). A sorfejtés esetében meghatároztuk mindegyik VESZ állomásnál a kovarianciamátrix elemeit (Gyulai és Ormos 1999a)

$$\sigma_{km} = \sigma_k(x_m) = p_k^{-1}(x_m) \sqrt{\sum_{i=1}^{J(k)} \sum_{j=1}^{J(k)} \{\Psi_{ki}(x_m) \Psi_{kj}(x_m) \text{COV}_{ij}\}}, \quad (4a)$$

ahol $\sigma_k(x)$ jelöli a k -ik modellparaméter (pl. ellenállás vagy vastagság) becslési hibáját és σ_{km} ugyanezt jelöli az m -ik VESZ állomáson (ha $x = x_m$). K a $p_k(x)$ modellparaméterek számát ($k = 1, 2, \dots, K$), valamint M a szelvény menti VESZ állomások számát mutatja ($m = 1, 2, \dots, M$). $J(k)$ a k -ik modellparamétert leíró sorfejtés bázisfüggvényében az elemek száma, $\Psi_{ki}(x)$ és $\Psi_{kj}(x)$ az i -ik és j -ik bázisfüggvények, és COV_{ij} a becsült sorfejtési koefficiensek kovarianciamátrixának elemei (Menke 1984).

Ahhoz, hogy a paraméterbecslésről átfogó képet kapjunk, be kell vezetnünk az F átlagos (százalékos) becslési hibát:

$$F = \sqrt{\frac{1}{KM} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sigma_{km}^2} \times 100\%. \quad (4b)$$

Ahhoz, hogy a becsült modellparaméterek közötti korreláltság mértékét leírjuk, a széles körben használt korrelációs mátrixot alkalmaztuk a teljes szelvény egészére.

$$\text{CORR}_{ij} = \text{COV}_{ij} [\text{COV}_{ii} \text{COV}_{jj}]^{-1/2}.$$

A mátrix elemeinek nagy száma miatt hasznos lehet bevezetnünk egy skalárt

$$S = \sqrt{\frac{1}{P(P-1)} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P (\text{CORR}_{ij} - \delta_{ij})^2}, \quad (5)$$

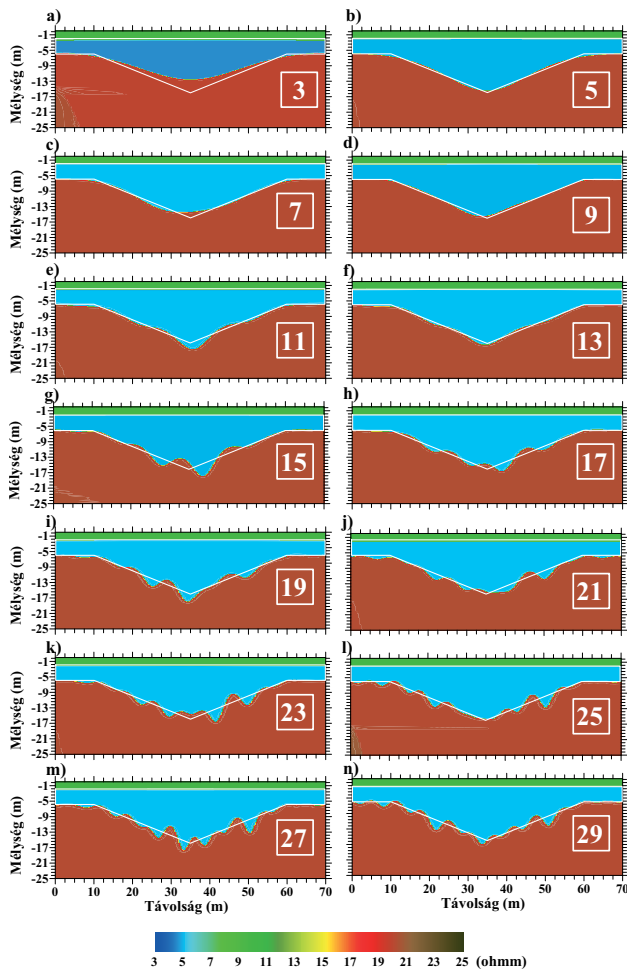
amelyet átlagkorrelációnak nevezünk (Menke 1984). Itt P a modellparaméterek száma, míg δ_{ij} a Kronecker-szimbólum. Minél kisebbek az egész invertált szegmenst jellemző D , F és S értékei, annál megbízhatóbbak a 1,5D és CGI inverzió eredményei. Terepi esetben az inverziós eredmények jellemzésére csak az F és S értékeket tudjuk használni. Ezeken kívül azoknál a kutatásoknál, amelyeknél szintetikus adatokat használunk, a D modelltávolságot is alkalmazhatjuk. Az együtthatók optimális számának meghatározásához az előbb említett mennyiségeket használhatjuk.

Az együtthatók optimális száma

A sorfejtésen alapuló inverziós módszerek esetén fontos meghatározni a sorfejtési együtthatók optimális számát. Ez a szám a földtani szerkezettől és az adatok által hordozott zajtól függ, azonban magát a szerkezetet csak az inverzió után ismerjük meg. A 1,5D és CGI inverziós eljárások (szintetikus és terepi adatokon végrehajtott) vizsgálatai megmutatták, hogy különböző számú együtthatók többféle eredménymodellt határozhatnak meg a d normalizált adattávolság hasonlóan alacsony értéke mellett is. Ennek következtében a legjobb eredményül szolgáló modell kiválasztásának az F átlagos becslési hiba minimumától és a D modelltávolságtól kellene függnie szintetikus esetben. Az együtthatók optimális számának meghatározását optimalizációs eljárásként is kezelhetjük. Ezt a feladatot különböző számú együtthatókra futtatott CGI programsorozattal oldottuk meg.

Az eljárás bemutatásához két szintetikus modellt használtunk. Az első esetben háromréteges 2D modellt választottunk egyenes szakaszokból álló réteghatárokkal (a 2. ábrán fehér vonalakkal ábrázolva, Gyulai et al. 2007).

E vizsgálat során a modellben csupán a rétegvastagságok változtak laterálisan. A 2. ábrán látható modellparaméterek értékei a következők: $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 5 \Omega\text{m}$ és $\rho_3 = 20 \Omega\text{m}$. A rétegvastagságokat trigonometrikus sorokkal írtuk le. Az első rétegvastagság esetén az együtthatók száma 3 volt. A második rétegvastagság becsléséhez 3 és 29 között változó számú együtthatót választottunk (a 2. ábrán fehér négyszögekben foglalt számokkal jelölve). A modelleket a CGI módszer segítségével értékeltük egyenként, minden egyes együtthatószámra. Az eredmények a 2. és 3. ábrán láthatók (Gyulai et al. 2007). A 3.a ábrán azt figyelhetjük meg, hogy a d normalizált adattávolság az együtthatók számának függvényében gyorsan eléri a minimális értékét, és azután nem változik. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy számos különböző, eredményül kapott modell létezhet (különböző számú együtthatókkal) ugyanolyan d adatilleszkedési érték mellett (zöld pontok és illesztési görbe a 3.a ábrán). Az F átlagos becslési hiba és a D relatív modelltávolság is 9-nél éri el minimális értékét, mely az optimális együtthatószámnak tekinthető. A legjobb illeszkedéshez tartozó eredmények grafikusán a 2. ábrán láthatók.

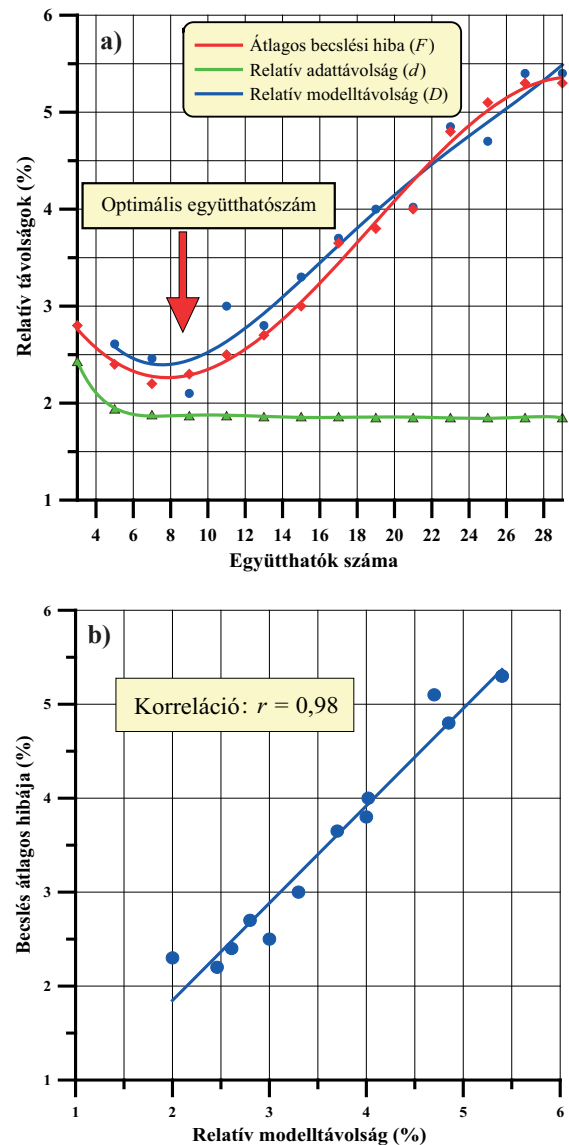


2. ábra Az együtthatók optimális számának keresése. a–n) A második réteg vastagságának (fehér téglalapok) megfelelő együtthatók számát alkalmazó CGI eredményei. d) Az együtthatók optimális száma 9 (lásd még a 3.a ábrán)

Figure 2 Finding the optimal number of the coefficients. a–n) Results of CGI-s using different number of coefficient regarding to the second layer thickness (white boxes). d) The optimal coefficient number is 9. (See also in Fig. 3.a)

Az F és D közötti korreláció értéke közel 1 (lásd 3.b ábra). Ennek következtében terepi alkalmazás esetén (ahol a D relatív modell távolságot nem lehet meghatározni) az együtthatók optimális számát d és F egyidejű minimumánál kell keresni. Egy ettől eltérő típusú szintetikus modell esetére szintén hasonló eredményt kaptunk

A második esetben a modellünket egy homogén feltérbe helyezt, nagy fajlagos ellenállású „blokk” alkotta (fehér négyzetek a 4. ábrán). Az ilyen típusú modell leírására nem a trigonometrikus sorba fejtett folytonos függvényvel való leírás a legalkalmasabb. (A modellparaméterek és a 4. ábrán használt szintetikus adatok később a szövegben olvashatók.) E vizsgálat során minden modellparamétert (vastagság és fajlagos ellenállás) trigonometrikus sorokkal írunk le (az eljárás stabilitása miatt) 3-3 együtthatóval. Ez alól kivétel a második réteg fajlagos ellenállásának együtthatóinak száma, melyet 7-ről 15-re változtattunk, öt lépésben

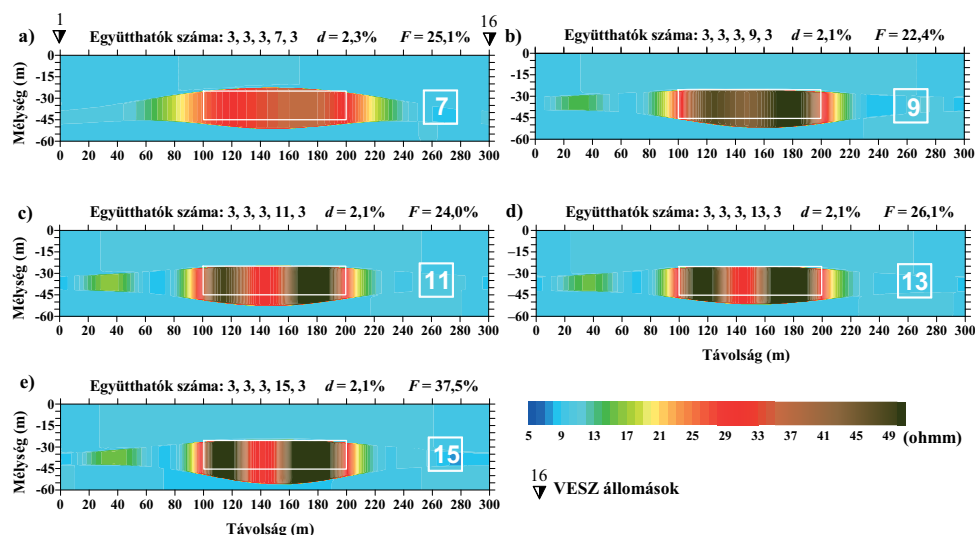


3. ábra a) Az együtthatók optimális száma d , F és D minimumánál található. Lásd még 2.d ábrán. b) A becslés átlagos hibája (F) és a relatív modell távolság (D) majdnem teljesen korrelál

Figure 3 a) The optimal number of coefficients can be found at the minimum of d , F and D . See also in Fig. 2.d. b) The main estimation error (F) and the relative model distance (D) are almost entirely correlated

(fehér négyzetek az együtthatószámmal a 4. ábrán) CGI inverziók sorozatával.

A d normalizált adattávolság az együtthatók számának függvényében 2,1%-nál érte el minimumát. Ez az érték változatlan maradt minden olyan eredményül kapott modell esetén, melyeket több mint 7 együtthatóval közelítettünk. Az F átlagos becslési hiba minimális értéke 22,4% volt 9 együttható esetén. (E modelltípus esetén nem használhatjuk a D relatív modell távolságot, mert a „blokkmodellen” kívüli feltér rétegvastagság értékei meghatározhatatlanok.) Az együtthatók optimális számát d és F egyidejű minimális



4. ábra Az együtthatók optimális számának keresése. a–e) A CGI eljárás eredményei eltérő számú együttható alkalmazásával tekintettel a második réteg ellenállására (téglalappal). b) Az együtthatók optimális száma 9, amely a d és F minimumához tartozik

Figure 4 Finding the optimal number of the coefficients. a–e) Results of CGI-s using different number of coefficients regarding to the second layer resistivity (white boxes). b) The optimal coefficient number is 9, which is to be found at the minimum of d and F

értékeit keresve *trial and error* eljárás eredményeként kaphatjuk meg. A gyors CGI eljárással több inverziót hajthatunk végre különböző együtthatószám kipróbálására viszonylag rövid időn belül. Az együtthatók optimális száma a jelenlévő zaj mennyiségétől és típusától függhet, azonos modellek esetén is különböző értékek adódhatnak.

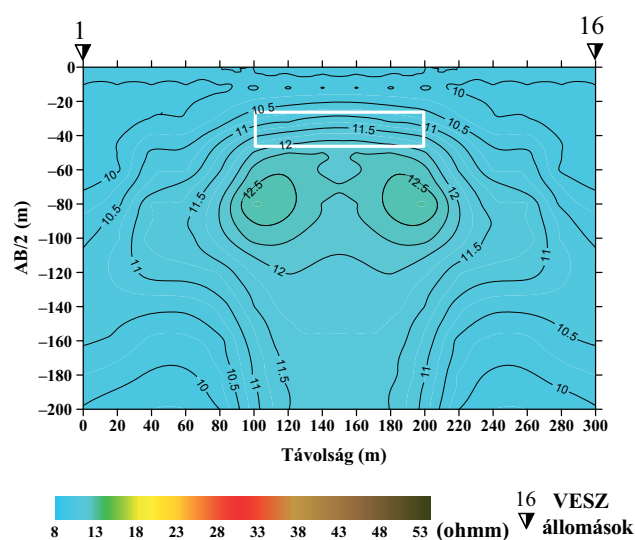
A CGI módszer szintetikus adatokon történő alkalmazása

A javasolt inverziós módszerek legfontosabb jellegzetességeinek leírásához szintetikus adatrendszereket generáltunk egy olyan modellen, melyet már korábban publikáltak (Loke, Barker 1996). Ebben a modellben $\rho = 50$ ohmm ellenállású 2D téglalap alakú (20×100 m) testet ágyasztunk 25 m mélységben a 10 ohmm ellenállású közegbe. Ugyanezt a modellt használtuk annál a vizsgálatnál, melyet a 4. ábra mutat be.

A vizsgálathoz a szintetikus látszólagos fajlagosellenállás-adatokat 16 állomásnál, 3,2–200 méteres AB/2 távolságok mellett Schlumberger-elektroda elrendezésben számítottuk Spitzer (1995) FD programja segítségével. A 5. ábra a modellt (téglalappal) és a számított Schlumberger-féle látszólagos fajlagosellenállás-értékek pszeudoszelvényét ábrázolja.

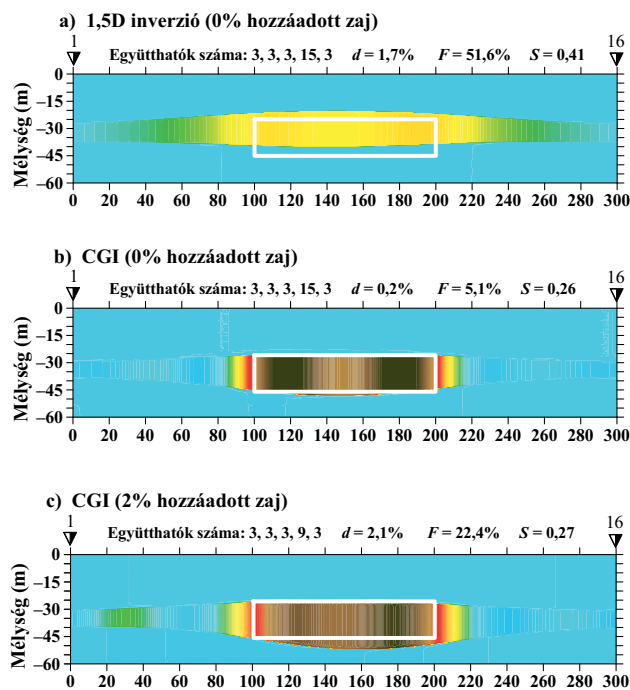
Ezt a zajmentes adatrendszert használtuk bemeneti adatként a CGI és 1,5D inverziós eljárásoknál. A kutatott 2D modell három rétegből áll, laterális irányban folyamatosan változó paraméterekkel. Mind a rétegvastagságokat, mind a fajlagosellenállás-értékeket Fourier-sorfejtéssel diszkrétizáltuk. Minden rétegvastagság, valamint az első és harmadik fajlagos ellenállás 3-3, míg a második 17 együtthatóval írható le.

A 6.a ábra a 1,5D inverzió eredményét mutatja be 35 iterációs lépés után. Ez volt az inverziós eljárás első fázisa (lásd 1. ábra). (A 6.a és 6.b ábrán a sorfejtési együtthatók maximális száma $2L_1 + 1, 2L_2 + 1, 2K_1 + 1, 2K_2 + 1, 2K_3 + 1$ látható, melyeket az (1) és (2) egyenletekben találunk. Például, ha „az együtthatók száma: 3, 3, 3, 15, 3” a két vastagságértéket 3 sorfejtési együtthatóval írjuk le, míg a rétegek $\rho_1(s), \rho_2(s), \rho_3(s)$ fajlagos ellenállásának függvényeit rendre 3, 15 és 3 együtthatójú Fourier-sorfejtési együtthatóval közelítjük).



5. ábra Homogén féltérben 2D téglalap alapú hasábmódel (fehér téglalap) és az FD eljárással Schlumberger-elrendezésben, 16 állomásra számolt látszólagos fajlagosellenállás-értékei

Figure 5 2D rectangular prism model in a homogeneous half space (white box), and its apparent resistivity response calculated by FD method for Schlumberger array at 16 stations

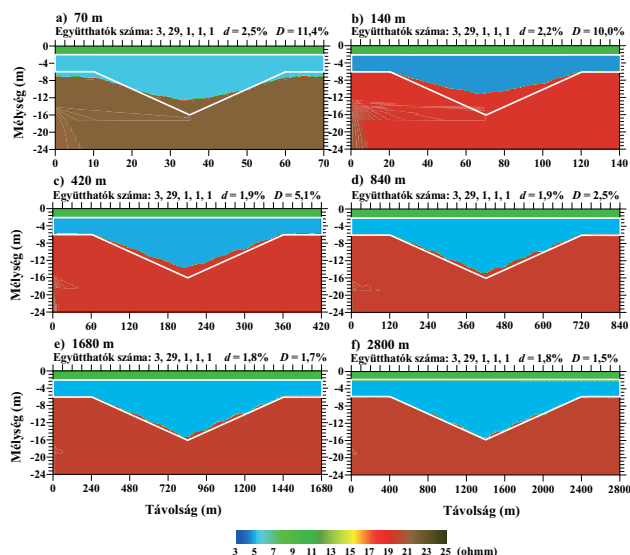


6. ábra Az inverziós eredmények összehasonlítása az 5. ábra szintetikus adatait felhasználva. a) 1,5D inverzió zajmentes adatokkal; b) CGI zajmentes adatokkal; c) CGI 2%-os zajjal terhelt adatokkal

Figure 6 Comparison of inversion results using synthetic data of Fig. 5. a) 1,5D inversion with noise-free data; b) CGI with noise-free data; c) CGI with 2%

A CGI eljárás a második fázisban 2D előremodellezéssel (1. ábra) folytatódott, melynek eredményei 4 iterációs lépést követően a 6.b ábrán láthatóak. A 1,5D és CGI módszerek eredményének összehasonlítása végett azonos számú sorfejtési együtthatót használtunk. Összehasonlítva a d , F és S értékeket kijelenthetjük, hogy a javulás jelentős, hiszen a 1,5D inverziós $d = 1,7\%$, $F = 51,6\%$ és $S = 0,41\%$ értékek a CGI eljárást alkalmazva $d = 0,2\%$, $F = 5,1\%$ és $S = 0,26\%$ értékekre csökkentek. A CGI első fázisában (zajmentes adatok esetében) a viszonylag magas értékű d a kombinált inverzió első részében alkalmazott 1D előremodellezés következménye. A fajlagosellenállás-anomália alakja majdnem pontosan közelíti a téglalap alakú inhomogenitás alakját, valamint a fajlagosellenállás-értékek is közel állnak a tényleges értékekhez ($\rho_1 = 10$ ohmm, $\rho_2 = 50$ ohmm, $\rho_3 = 10$ ohmm). Az inverzióban az ismeretlenek (sorfejtési együtthatók) száma 27 volt.

Fontos látni, hogyan is működik a CGI módszer zajos adatok esetén, ezért az előző adatrendszert (5. ábra) 2%-os Gauss-eloszlású zajjal terheltük. Ahogy azt a 6.c ábra is mutatja, az együttes inverziós módszer hasonlóan jó eredményt ad zajos adatok esetén is. Ebben az esetben – zaj jelenlétében – a második réteg fajlagosellenállás-függvénye együtthatóinak optimális száma 9. Ez az eljárás és a legjobb modell az előző részben bemutatott 4b. ábrán látható. A relatív adattávolság 2,1% (közel azonos a bemeneti adatok hibaszázalékával). Az átlagos becslési hiba (a (4a) egyenlet-



7. ábra A 1,5D inverziós módszer használhatósága különböző hosszúságú 2D földtani modellek esetén, zajos szintetikus adatok felhasználásával. a–b) Viszonylag rövid modellek esetén az 1D közelítés csak számottevő hibával használható. c–f) hosszú modellek, melyek 1D-ként kezelhetők, esetén az 1D közelítés elfogadható hibát eredményez

Figure 7 Test of the 1,5D inversion on models with different length, using noisy synthetic data. a–b) In the case of relatively short models the 1D approximation can be used only with considerable error; c–f) in the case of the long models, which can be treated as nearly 1D ones, the using 1D approximation results in acceptable errors

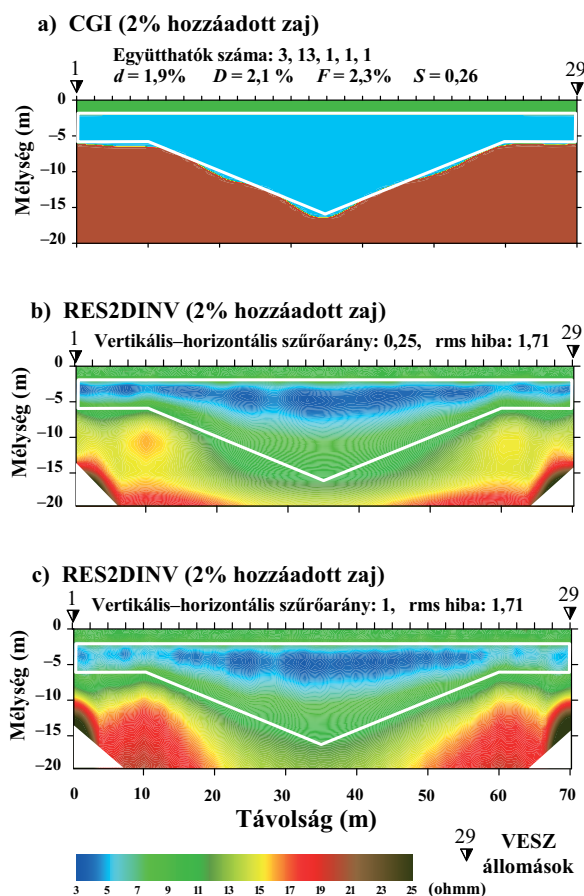
ben definiálva) $F = 22,4\%$, mely viszonylag magas, amelyet a második rétegben a fajlagos ellenállások értékeinek kisebb hullámzása okozott (ez a Fourier-sorfejtésből adódik). Az átlagkorreláció, mely a sorfejtési együtthatók korrelált természetét írja le, $S = 0,27$, gyengén korrelált (azaz megbízható) eredményeket mutat. Ezzel ellentétben az 1D inverzió és normál terepi körülmények esetében S értéke elérheti a 0,7-et.

Fontosnak találtuk a 1,5D közelítés pontosságát különböző mértékben változó földtani szerkezetek sorozatán megvizsgálni. Ahhoz, hogy ezt megtehesük, hat azonos alakú modellt definiáltunk (7. ábra).

Minden modell háromréteges, a második és harmadik réteg között húzódó réteghatár egyenes szakaszokból áll. A szelvényhossz a modell mentén, azaz profiltávolság, 70 m és 2800 m között változik 6 lépésben, míg az összes modell vertikális mérete változatlan marad.

Így egy modellsorozatunk adódik, amely 2D (7.a ábra) és majdnem 1D (7.f ábra) között változik. A szintetikus adatokat FD módszerrel számítottuk 1,6 és 50 m közötti elektrodátávolságú Schlumberger-elrendezésre a szelvény mentén, 29 állomáson. A szintetikus adatokat 2%-os Gauss-zajjal terheltük.

A 1,5D módszer tesztelése során a diszretizáláshoz Fourier-sorfejtést használtunk. Az első vastagságértéket 3, a másodikat pedig 29 együtthatóval írtuk le. Hogy tisztán lássunk, az ellenállás laterálisan változatlan; azaz mindegyiket



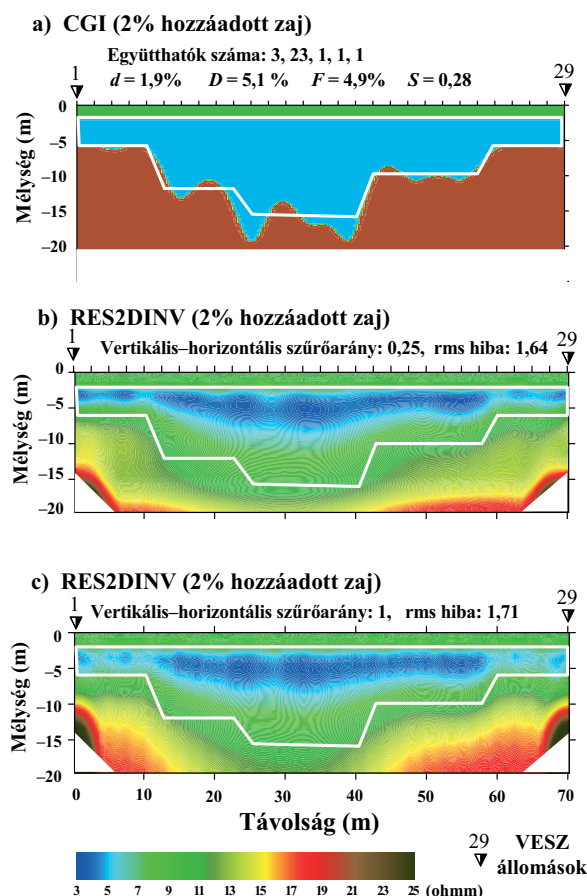
8. ábra Zajos szintetikus adatrendszer inverziós eredményeinek összehasonlítása. a) CGI eredményei; b) RES2DINV eredményei, ahol a vertikális-horizontális szűrőarány: 0,25; c) RES2DINV eredményei, ahol a vertikális-horizontális szűrőarány: 1,0

Figure 8 Comparison of inversion results of noisy synthetic data. a) Result of CGI; b) result of RES2DINV using vertical to horizontal filter ratio of 0,25; c) result of RES2DINV using vertical to horizontal filter ratio of 1,0

egy-egy együtthatóval írtuk le (ami egyébként nem lenne szükségszerű). Így a sorfejtési együtthatók a tesztek során rendre: 3, 29, 1, 1, 1 voltak.

Ahogy a 7.a-f ábrán is látható, a pontos és becsült modellek közti relatív távolság a modell-távolság (D a (3b) egyenletben definiálva) a modell laterális méretének növekedésével jelentősen csökken. A várakozásoknak megfelelően az 1,5D inverzió (1D előremodellezést tartalmazva) jobb becslést ad hosszú modellek (7.c-f ábra) esetén, ahol 1D modellezés helyes közelítés. Azonban a 7.a-b ábra modelljei esetében az 1D közelítés csak számottevő hibával alkalmazható annak ellenére, hogy az 1,5D egyébként az egyedi 1D inverzióhoz képest jobb eredményt ad.

Ezen okból kifolyólag a számítást 5 CGI iterációval folytattuk, hogy tökéletesítsük a modellt. A gyorsan változó modellen (7.a ábra) elvégzett együttes inverzióval elérhető adott pontosság a 2D előremodellezésnek köszönhető. A modellre vonatkozóan a CGI inverzió eredménye a 2.d ábrán látható. D értékére 2,1%-ot kaptunk CGI esetében és



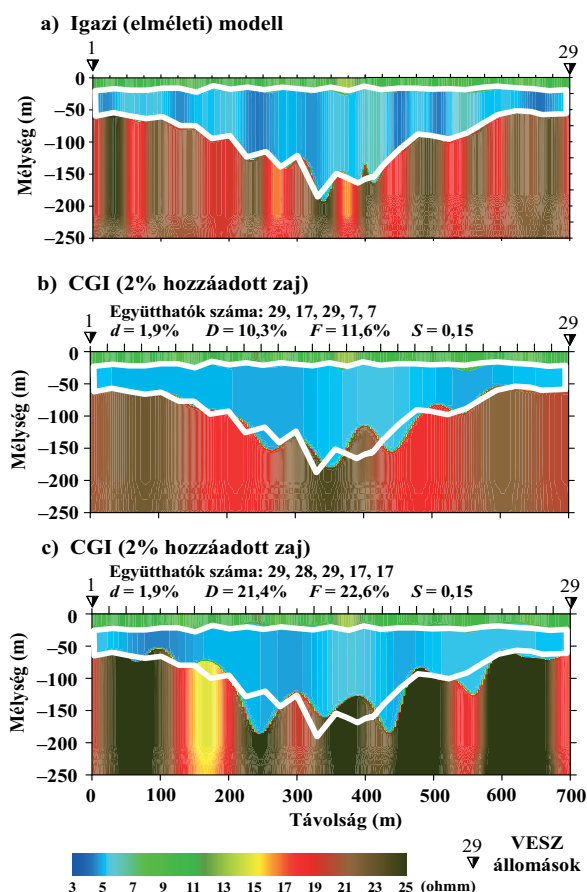
9. ábra Zajos szintetikus adatrendszer inverziós eredményeinek összehasonlítása hibás modellen. a) CGI eredményei; b) RES2DINV eredményei, ahol a vertikális-horizontális szűrőarány: 0,25; c) RES2DINV eredményei, ahol a vertikális-horizontális szűrőarány: 1,0

Figure 9 Comparison of inversion results of noisy synthetic data on a fault model. a) Result of CGI; b) result of RES2DINV using vertical to horizontal filter ratio of 0,25; c) result of RES2DINV using vertical to horizontal filter ratio of 1,0

11,4%-ot (7.a ábra) 1,5D inverzió esetében. Gyakorlatilag mindkét esetben d értékei ugyanazok.

Összehasonlításképpen a 8.a ábra a CGI eljárás használatával (lásd még 3.d ábra) előállított 2D modellt mutatja, ahol a következő értékeket kaptuk: $d = 1,9\%$, $D = 2,1\%$, $F = 2,3\%$ és $S = 0,26$. A kereskedelembe kapható inverziós szoftvert, a RES2DINV-et (Geotomo Software) alkalmazva, melyet a geoelektromos gyakorlatban elterjedten használnak, a 8.b-c ábrán látható eredmények adódtak. Itt a legjobb eredmény elérése érdekében az alábbi értékeket használtuk: vertikális-horizontális szűrőarány = 0,25 (8.b ábra) és 1,0 (8.c ábra), a modellblokkok maximális száma 50. A RES2DINV szoftverrel számított rms-érték 1,71 mind a 8.b és 8.c ábrára vonatkozólag. A 8.a-c ábra adatrendszerei 2%-os Gauss-zajjal terheltek.

A 9.a ábrán a 8. ábrához hasonló modell látható azzal a különbséggel, hogy a második rétegben vetők sorozatát látjuk. A CGI eljárás használatával a következő értékeket kaptuk: $d = 1,9\%$, $D = 5,1\%$, $F = 4,9\%$ és $S = 0,28$.



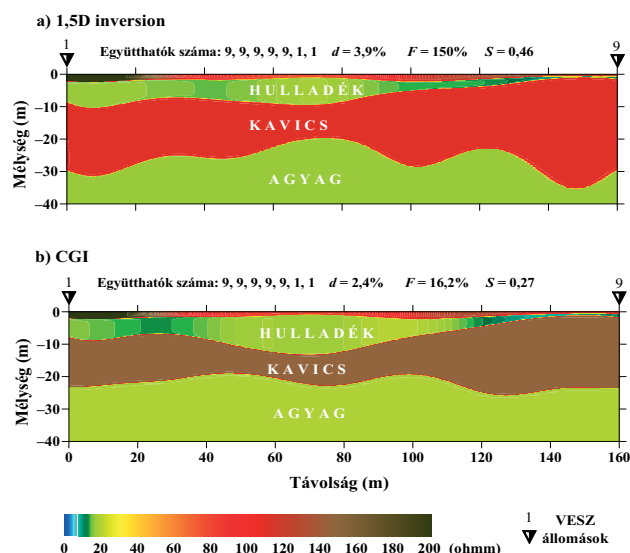
10. ábra Zajos szintetikus adatrendszer CGI eredményeinek összehasonlítása horizontálisan gyorsan változó modellen. a) Igazi (elméleti) modell; b) CGI eredményei kisszámú együtthatót használva; c) CGI eredményei nagyszámú együtthatót használva

Figure 10 Comparison of CGI results of noisy synthetic data on a model with horizontal rapidly changing parameters. a) True (theoretical) model; b) result of CGI using lower number of coefficients; c) result of CGI applying higher number of coefficients

A RES2DINV esetében a szoftver belső paramétereire az alábbi értékeket használtuk: vertikális–horizontális szűrősimaság = 0,25 (9.b ábra) és 1,0 (9.c ábra), a modellblokkok maximális száma 50. A RES2DINV szoftverrel számított rms-érték 1,64 a 9.b és 1,71 a 9.c ábrára vonatkozólag. A 9.a–c ábra adatrendszereit 2%-os Gauss-zajjal terheltük.

Mint azt az előző összehasonlítása megmutatja, a CGI módszer túlhatározott inverz feladatot old meg (bármiféle nem fizikai feltétel vagy simítás nélkül), ezért sokkal élesebb határokat ad, mint a RES2DINV, melynek használatával simított földtani modellt kapunk átmeneti réteghatárokkal.

A CGI eljárás tesztelésére a 10. ábrán látható új, gyorsan változó modellt definiáltunk úgy, hogy az előbbi, lassan változó modellparaméter-értékeket (azaz fajlagos ellenállást és rétegvastagságot) véletlenszerűen megváltoztattuk 10%-kal. Ezen a modellen Spitzer módszere alapján FD modellezéssel számított látszólagos fajlagos ellenállásokat 2%-os Gauss-zajjal terheltük. A CGI eljárással kapott modellek a



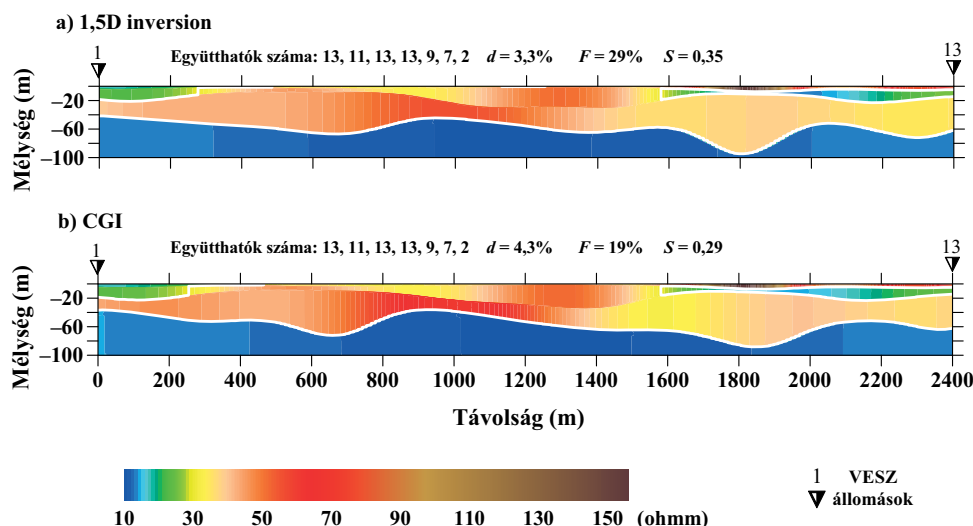
11. ábra Hulladéklerakó felett mért VESZ adatok CGI és 1,5D inverziós eredményeinek összehasonlítása. a) Magas értékű d , F és S -et eredményező 1,5D inverzió eredményei; b) A CGI megbízhatóbb eredményt szolgáltat, mert jelentősen alacsonyabb értékeket eredményez d , F és S -re

Figure 11 Comparison of 1,5D and CGI inversion of VES data, measured over a waste deposit. a) The 1,5D inversion results high values of d , F and S ; b) The CGI gives considerable less values for of d , F and S , yielding more reliable results

10.a és 10.b–c ábrán láthatóak. Az együtthatók optimális számát 29, 17, 29, 7, 7-nek választottuk. Így a $d = 1,9\%$, $D = 10,3\%$, $F = 11,6\%$ és $S = 0,15$ értékek adódtak. A 10.b ábrán látható, hogy minél gyorsabb az ellenállás változása, annál nagyobb számú együtthatót kell használnunk a CGI módszer esetében. De a 10.c ábrán az is látszik, hogy az együtthatók számának indokolatlan növelése lerontja az inverziós eredmény minőségét, amelyet az együtthatók optimális számának megválasztásával elkerülhetünk.

Terepi példa

A 1,5D és CGI inverziós módszereket in situ környezet-geofizikai problémán is tanulmányoztuk. A kutatási terület egy hulladéklerakó volt Miskolc közelében, Északkelet-Magyarországon. A szelvény mentén 9 VESZ állomáson 198 adatot gyűjtöttünk. A sorfejtési együtthatók mindegyik esetben azonosak voltak: 9, 9, 9, 9, 9, 1, 1. Ahogy az a 11. ábrán látható, a 1,5D módszer olyan becsült modellt adott eredményül, melynek közepes becslési hibája rendkívül nagy ($F = 150\%$), és a sorfejtési együtthatók közti korreláció viszonylag magas ($S = 0,46$). Másrészről az új CGI eljárás jelentősen kisebb adattávolságot és közepes paraméterbecslési hibát ($F = 16,2\%$) eredményezett. A relatív nagy hibát mindegyik esetben az igen vékony első réteg paramétereinek becslési hibája okozta, annak ellenére, hogy az ismeretlenek száma mind a két inverziós feladatban megegyezik, az átlagszórás (definiálva az (5) egyenletben) számottevően kisebbnek adódik a CGI eljárásban ($S = 0,27$),



12. ábra | Vízadó összlet felett mért VESZ adatok CGI és 1,5D inverziós eredményeinek összehasonlítása. a) 1,5D inverzió eredménye; b) A CGI eredménye. Az is látszik mindkét ábrán, hogy a sorfejtéses módszer láthatóvá teheti a rétegek kibúvását vagy vékony rétegvastagságokkal, vagy a szomszédos rétegek ellenállás értékeinek csaknem megegyezésével

Figure 12 | Comparison of 1,5D and CGI inversion of VES data, measured over an aquifer. a) The result of 1,5D inversion; b) The result of CGI. It is also seen in both figures that the technique of expansion series may visualize the outcrop of layers with thin layer thickness or nearly the same value of resistivities in adjacent layers

s ezzel a CGI módszer kevésbé korrelált (azaz megbízhatóbb) paraméterbecslést mutat.

A másik terepi példa a Tisza folyónál fekvő víztározó kavicsos összlet kutatása volt. A földtani szerkezet agyagos aljzattal rendelkező inhomogén kavicsos-homokos rétegsor. A szerkezetet 4 réteges modellel közelítettük és megengedtük, hogy mind a fajlagos ellenállások, mind a rétegvastagságok gyorsan változhatnak. Az együtthatók optimális száma ebben az esetben 13, 11, 13 a vastagságokra és 13, 9, 7, 2 az ellenállásokra. A szelvény mentén 13 VESZ állomáson 312 adatot gyűjtöttünk. A 1,5D és a CGI inverzió eredményeit a 12. ábra hasonlítja össze. Az ábrán látszik, hogy ez a módszer láthatóvá teheti a rétegek kiemelődését vékony rétegvastagságokkal vagy a szomszédos rétegek ellenállásértékeinek (közel) azonosságával. Ennek alapján levonható az a következtetés, hogy a CGI inverziót az előforduló legnagyobb rétegszámra kell futtatni, ha valamely réteg(ek) kiemelődik(nek), azt az inverzió az előbb említett módon „megoldja”. Ez látható például $s = 1200$ m-nél. Összehasonlítva a 1,5D és CGI eljárásokat, az átlagos paraméterbecslési hiba 29%-ról 19%-ra, valamint az átlagos korreláció 0,35-ről 0,29-re csökkent.

Összefoglalás

Összefoglalásképpen megállapíthatjuk, hogy a sorfejtéses inverziós eljárás alkalmazása 2D szerkezeteken mért geoelektromos adatok feldolgozásában is termékeny gondolat, és az erre épített új, kombinált inverziós eljárás ígéretes a kétdimenziós földtani szerkezetek paramétereinek meghatározására. A sorfejtéssel történő diszkretizáció következtében – a nemzetközi gyakorlatban általánosan használt mód-

szerekkel összehasonlítva (melyekben a rácsháló minden eleme ismeretlen paramétert jelöl) – az ismeretlenek száma drasztikusan csökkenthető úgy, hogy az a mérési adatok számánál is lényegesen kisebbnek adódik. A túlhatározott inverz feladat megoldása miatt a sorfejtéses inverziós (CGI) módszer nagy pontossággal állítja vissza a szintetikus 2D földtani modelleket. A rövidebb számítási idő érdekében a CGI módszer két fázisból állt. Először 1,5D inverzióval (1D előremodellezést alkalmazva) egy megfelelő startmodellt számítottunk a második fázishoz, ahol a linearizált inverziós eljárásban 2D előremodellezést hajtottunk végre.

Bemutattunk, hogy egy adott zajszintnél csak kisebb pontossággal tud visszaállítani bonyolultabb modelleket, mint ugyanazon fizikai paraméterekkel rendelkező, de egyszerűbb modelleket (lásd 8.a és 9.a ábra).

Mindemellett az együtthatók számának indokolatlan növelésével csökkentjük az inverziós eredmények minőségét, amelyet elkerülhetünk, ha az együtthatók számát optimálisnak választjuk (lásd 2–4. és 10. ábra). Az adathibáktól függően az inverzióval meghatározható modell bonyolultsága korlátozott van. Az előbbi határon túl jobb inverziós eredményeket akkor kaphatunk, ha együttes inverziós módszert használunk és további adatrendszereket és/vagy fúróluk információkat vonunk be.

A 2D CGI módszert könnyen általánosíthatjuk 3D földtani szerkezetek esetére. A Spitzer által kifejlesztett előremodellezési módszer bár bonyolultabb más 2D eljárásoknál, lehetőséget ad dőlés- és csapásirányú mérési adatok együttes inverziójára vagy olyan szerkezetek kutatására, amelyeknél csak csapásirányban végezhető mérések (például partfalak stabilitásvizsgálata). Úgy gondoljuk, hogy hasznos lenne különböző mérési elrendezésben, a sorfejtés-

ben más típusú bázisfüggvényekkel bonyolultabb modelleken további kutatásokat végezni és ellenőrizni a módszert számos 3D terepi modellen.

Köszönetnyilvánítás

A fentiekben bemutatott kutatásainkat részben az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatásával folytattuk (OTKA T042686 és T062416). Az MTA–ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport tagjaként az egyik szerző (D. M.) köszönetét fejezi ki a Magyar Tudományos Akadémiának a kutatócsoport támogatásáért.

Hivatkozások

- Auken E., Christiansen A. V., 2004: Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics* 69, 752–761
- Auken E., Christiansen A. V., Jacobsen B. H., Foged N., Sorensen K. I., 2005: Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data. *Geophysical Prospecting* 53, 497–507
- Auken E., Pellerin L., Christiansen N. B., Sorensen K. I., 2006: A survey of current trends in near surface electrical and electromagnetic methods. *Geophysics* 71/5 G249–G260
- Blaschek R., Hördt A., Kemna A., 2008: A new sensitivity-controlled regularization scheme for the inversion of induced polarization data based on minimum gradient support. *Geophysics* 73, F45–F54
- Christiansen A. V., Auken E., 2004: Optimizing a layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data using Broyden's update and 1D derivatives. *Journal of Applied Geophysics* 56, 247–261
- Dobróka M., 1994: Változó rétegvastagságú inhomogén szeizmikus hullámvezetőben terjedő Love-típusú hullámok diszperziós relációja; az abszorpciós-diszperziós jellemzők inverziója. MTA doktori értekezés. Miskolc – Budapest
- Gallardo L. A., Meju M. A., 2004: Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints. *J. Geophysical Research* 109, 03311
- Geotomo Software: RES2DINV ver. 3.55, Malaysia. (www.geoelectrical.com)
- Gyulai Á., 2001: 2D földtani szerkezetek interpretációja együttes geoelektromos inverziós módszerekkel. MTA doktori értekezés. Miskolc – Budapest
- Gyulai Á., Ormos T., 1997: Vertikális elektromos szondázások kiértékelése 1.5-D inverziós módszerrel. *Magyar Geofizika* 38, 25–36
- Gyulai Á., Ormos T., 1998: Újabb eredmények a VESZ adatok 1.5-D inverziós kiértékelésében. *Magyar Geofizika* 38, 257–264
- Gyulai Á., Ormos T., 1999a: A new procedure for the interpretation of VES data: 1.5-D simultaneous inversion method. *Journal of Applied Geophysics* 41, 1–17
- Gyulai Á., Ormos T., 1999b: Hohlraumortung mit geoelektrischen und oberflächenseismischen Methoden. 59. DGG Tagung, Braunschweig, March 8–12, 1999. PGT05, p. 116
- Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., Kavanda R., 2007: The strategy of joint inversion using function series. EAGE Near Surface Conference and Exhibition, Istanbul 3–5. September 2007. p. 24
- Gyulai Á., Ormos T., Dresen L., 2000: A joint inversion method to solve problems of layer boundaries, differently defined by seismics and geoelectrics. 6th Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society – European Section, September 3–7, 2000. Bochum, Germany (P-CH04)
- Haber E., Oldenburg D., 1997: Joint inversion: a structural approach. *Inverse Problems* 13, 63
- Hering A., Misiek R., Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., Dresen L., 1995: A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data: Part I. Basic ideas. *Geophysical Prospecting* 43, 135–156
- Kis M., 1998: Felszínközeli földtani szerkezetek vizsgálata szeizmikus és egyenáramú geoelektromos adatok együttes inverziójával. PhD értekezés. Miskolci Egyetem, Miskolc
- Kis M., Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., Dresen L., 1998: A new approach for the investigation of 2-D structures – method development and case-history. 60th EAGE Conference and Technical Exhibition, 8–12 June 1998
- Koefoed O., 1979: *Geosounding Principles, Resistivity Sounding Measurements*. Amsterdam
- Loke M. H., Barker R. D., 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131–152
- Menke W., 1984: *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press Inc.
- Misiek R., Liebig A., Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., Dresen L., 1997: A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface seismic data: Part II. Application. *Geophysical Prospecting* 45, 65–85
- Ormos T., 2002: Inversion of refracted travel-times for near-surface investigations. EAGE 64th Conference and Exhibition, 27–30 May. 2002. Florence, Italy. D025 Extended abstracts.
- Ormos T., Daragó A., 2005: Parallel inversion of refracted travel times of P and SH waves using a function approximation. *Acta Geodetica and Geophysica Hungarica* 40, 215–228
- Ormos T., Gyulai Á., Nyári Zs., 1999: Cavity detection with resistivity and shallow seismic methods. 5th EEGS-ES Meeting, September 6–9, 1999. Budapest, Proceedings, VoP2.
- Pellerin L., Wannamaker P. E., 2005: Multi dimensional electromagnetic modelling and inversion with application to near-surface earth investigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 71–102
- Spitzer, K., 1995: A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International* 123, 902–914
- Szabó N. P., 2004: Global inversion of well-logging data. *Geophysical Transactions* 44, 313–329
- Turai E., 2004: IP Data processing results from using TAU-transformation to determine time-constant spectra. *Geophysical Transactions* 44, 310–312
- Vozoff K., Jupp D. L. B., 1975: Joint inversion of geophysical data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 42, 977–991

Válasz Szalay István hozzászólására

POLCZ IVÁN[@]

Ötvös Loránd Geofizikai Intézet, 1145 Budapest, Kolumbusz utca 17–23.

[@]E-mail: ipolcz@t-online.hu

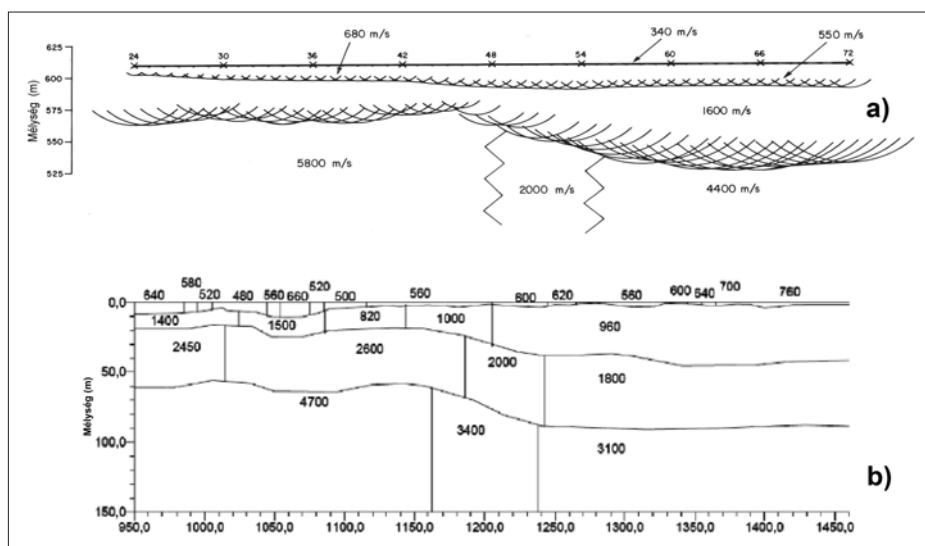
Polcz, I.: Reply to I. Szalay's comment on my paper "Follow-up of a seismic shallow refraction section"

Beérkezett: 2011. január 29.; elfogadva: 2011. február 18.

Szalay István kollegának a *Magyar Geofizika* 2010. 51. évf. 2. számában megjelent hozzászólása szerint publikációm (Polcz 2009) tárgyát képező szelvény eltérő értelmezései felvetik a refrakciós módszer *hitelességének* kérdését. A hitelesség kérdése két összetevő függvénye. Az egyik összetevő a terepi mérés megfelelő végrehajtása (észlelési távolságok hossza, elégséges fedésszám stb). A terepi adatokból szerkesztett refrakciós útidőgörbékkel kapcsolatban felmerülő kérdéseket és a többértelműsége vezető problémákat kimerítő alapossággal Ackermann, Pankratz és Danserau szerzők publikációja részletesen tárgyalja (Ackermann et al. 1986). A hitelességre vonatkozó másik összetevő a sebességviszonyok tisztázása és a mélységszelvény szerkesztése során alkalmazott eljárás (inverzió) megbízhatósága.

A sebességvizsgálat és a mélységszelvény szerkesztése megoldható hagyományos szerkesztési eljárásokkal, számítógépes interaktív modellezéssel vagy tomografikus eljárásokkal.

A hozzászólás tárgyát képező publikációban Palmer, Sjögren és Whiteley megoldásait mutattam be. Az a tény, hogy a T–X adatrendszerből három, formailag ugyan nagyjából hasonló, de rétegszám, sebességeloszlás és a mélységviszonyok tekintetében egymástól eltérő szerkezeti megoldás is levezethető, azért az alkalmazott inverziós eljárás a felelős. A három megoldás közül az első Palmertől származik. Palmer a mélységszelvény szerkesztésére saját dédelgett módszerét, a GRM-et alkalmazta. A GRM-mel kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy azt Palmer legelőször 1980-



1. ábra Whiteley és Eccleston (2006) publikációjából származó 6.a és 6.b egyesített ábra. Fent a mélységszelvény Palmer GRM módszerrel végzett szerkesztése (a), alul a VIRT interaktív szerkesztés eredménye (b) látható. A mérés útidőgörbe-rendszere Palmer 1980-ban kiadott könyvében (Palmer 1980) található (Line-4, pp. 99–101)

Figure 1 Joined figures 6.a and 6.b of Whiteley's and Eccleston's paper (Whiteley, Eccleston 2006). The upper depth section (a) was the result of Palmer's GRM method, while the lower one (b) that of the VIRT method. The seismic first arrival time data of the profile were taken from Palmer's book (Palmer 1980, Line-4, pp. 99–101)

ban, majd később szakirodalmi folyóiratokban és két rangos kiadású szakkönyvben is publikálta. Sikeresnek mondott alkalmazásáról több dolgozat számolt be. Érdekes, hogy egyes szeizmikus munkaállomásokba (work station) is beépítették. Annak ellenére, hogy az eljárást gyakran támadják, népszerűvé vált, amit minden bizonnyal a hozzá fűződő ügyes kereskedelmi érdek segít elő. A közelmúltban Seisa világos példák sorával világosan bizonyította a módszer megalapozatlanságát (Seisa 2007).

Kétségtelen, hogy esetünkben a rendelkezésre álló és nem minden szempontból kielégítő útidőgörbe-rendszerből a legtöbbet Sjögren (1925–2002) „hozta ki” hagyományos szerkesztésekkel (Sjögren 2000). Ez nem meglepő, mert a széleskörűen ismert és a nagyon gazdag tapasztalattal rendelkező szakemberek közé tartozott mind irodalmi, mind gyakorlati és oktató munkássága tekintetében. Aligha helytálló róla az a feltételezés, miszerint „keverte” a szinteket. Valószínűnek tarthatta, hogy a megszerkesztett mélysínt nem az utolsó mélysínt, de *elégséges adat hiányában* annak megszerkesztésére nem vállalkozott. A többiek sem. Whiteley VIRT szerkesztése egy harmadik megoldásváltozatot mutat be.

Az itt felmerült kérdések vizsgálatával különösen az ausztrál *Exploration Geophysics* folyóirat cikkeiben találkozhatunk. Az 1. ábrán bemutatott példa szerint ugyanazon adatrendszer kielégítő két különböző mélység-szelvény szerkesztésére látunk példát. A GRM eljárással csak két szintet szerkesztettek meg, interaktív komputeres szerkesztéssel ellenben az útidőgörbe-rendszert kielégi-

tő három szintet is részletes sebességeloszlás ábrázolásával.

Végezetül fel kell hívni a figyelmet, hogy a hozzászólásban ismertetett javaslatok és magyarázatok értékesek és feltétlenül megfontolandók. Komoly meggyőzés erejével hatna, ha a Szerző ajánlott javaslatai alapján saját szerkesztésű változatát folyóiratunk egy következő számában be is mutatná.

Hivatkozások

- Ackermann H. D., Pankratz L. W., Danserau D., 1986: Resolution of ambiguities of seismic refraction traveltimes curves. *Geophysics* 51/2, 223–235
- Palmer D., 1980: The generalized reciprocal method of seismic interpretation. Society of Exploration Geophysics, Tulsa
- Polcz I., 2009: Egy sekélyrefrakciós szelvény utóélete. *Magyar Geofizika* 50/3, 115–121
- Seisa H. H.: Is the optimum spacing of the generalized Reciprocal Method (GRM) constant or variable? 67th Annual Meeting of the German Geophysical Society (DGG), March 26–29, 2007, Aachen
- Sjögren B., 2000: A brief study of applications of the generalized reciprocal method and some limitations of the method. *Geophysical Prospecting* 48, 815–834
- Szalay I., 2010: Hozzászólás Polcz Iván „Egy sekélyrefrakciós szelvény utóélete” című cikkéhez. *Magyar Geofizika* 51/2, 99–100
- Whiteley R. J., Eccleston P. J., 2006: Comparison of shallow seismic refraction interpretation methods for regolith mapping. *Exploration Geophysics* 37, 340–347

Inhomogenitások lehatárolása elektro- mágneses frekvenciaszondázások alapján

(T049479. sz. OTKA-projekt, 2005–2009)

PETHŐ GÁBOR¹, TAKÁCS ERNŐ¹, FICSÓR LAJOS², SZABÓ ISTVÁN¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc-Egyetemváros

²Miskolci Egyetem, Általános Informatikai Tanszék, H-3515 Miskolc-Egyetemváros

Az elvégzett numerikus vizsgálatok és terepi mérések alapján az elektromos áram bipólus terének átmeneti zónájában a megfelelően megtervezett frekvenciaszondázási mérésekkel a szokásosnál kisebb adó–vevő távolságoknál is hasznos földtani információk nyerhetők mind a rétegződésre, mind a laterális szerkezeti változásokra. A frekvenciasáv alsó határát az a frekvencia jelenti, melynél a mért télerősség-komponens fajlagosellenállás- és frekvenciafüggése már nem szignifikáns. Bármely elektromágneses térkomponens frekvenciaszondázási görbéjéből a fajlagos ellenállásra egy effektív frekvenciaszondázási görbe határozható meg, mely átranzformálható a mélységtartományba is. A teljes frekvenciasávra vonatkozó effektív fajlagos ellenállás a mérések tervezésében, értelmezésében, a földtani szerkezeti viszonyok és az elektromágneses tér kapcsolatának tisztázásában jól alkalmazható.

A 2,5D-s FEM FD modellező rendszer vonatkozásában a számítási eredmények pontosítását, további mérési elrendezések esetén végzett modellezések elvégzését, a számítások gyorsabb előállítását és a párhuzamos számítást is lehetővé tevő fejlesztések valósultak meg. A 2,5D-s program alkalmazásával egy széles frekvenciatartományban kaptunk jó egyezést az adó–vevő felcserélhetőségi vizsgálatoknál mind a két forrás polarizációjára. Kiemelten foglalkoztunk az átmeneti zóna EM tértorzulásainak vizsgálatával. Az átmeneti zónát is lefedő modellezéseink során több (áramcsatornázási, galvanikus, különböző forrás) hatást megvizsgáltunk és azt tapasztaltuk, hogy a normált impedanciametszetek szerkezeti lehatárolásra alkalmazhatók még forrásáthatás esetén is.

Numerikus modellezéssel és terepi mérésekkel igazoltuk a villamos távvezetékek átmeneti zónaterében megjelenő alap- és felharmonikusok földtani információszerezésre való alkalmazhatóságát.

Pethő, G., Takács E., Ficsór L., Szabó, I.: Inhomogeneity delineation based on electromagnetic frequency sounding

Model studies and field measurements demonstrated that suitably planned EM frequency soundings in the transition zone of an electric dipole provide information both on layering and lateral changes even for less transmitter–receiver distances than the usual array. The lower boundary of the frequency interval is such a frequency value where the measured EM field component has not significant resistivity and frequency dependence. The transformation of any EM field component into effective resistivity in the frequency domain and the frequency–depth transformation of the effective resistivity were developed. These effective resistivities can be beneficial in the planning of measurements, the interpretation of the measurement in the transition zone and investigation the relationship between geological structures and EM fields.

A 2.5D FEM FD program system was developed to increase the accuracy of modelling, to perform modelling for additional arrays and to increase the computing performance using parallel processing. The reciprocity investigation for a wide frequency range was performed for the two source polarizations. Assuming HED sources current channelling, galvanic, source polarization, source overprint, shadow effect were investigated. It was demonstrated that the normalized impedance sections of the transition zone proved to be useful to delineate inhomogeneity under the receiver site even the case of source overprint effect.

To gain geological information in the transition zone of the EM fields due to the power lines we recommend to measure the ratio of the electric field components in two neighbouring sites at 50 Hz and the impedances at the upper harmonics of the 50 Hz along profiles parallel to the source.

Beérkezett: 2011. január 11.; *elfogadva:* 2011. február 20.

1. A mesterséges áramterű CSAET frekvenciaszondázás információtartalmának vizsgálata az átmeneti zónában^{a)}

A hagyományos CSAMT mérésnél – mesterséges áramterű magnetotellurika – az elektromos adó dipólus terét olyan adó–vevő távolságnál mérik, ahol az elektromágneses tér függőlegesen lefelé haladó síkhullámmá válik (távoli zóna). A megkívánt nagy adó–vevő távolság – a kutatási mélység 5–7-szerese – több szempontból hátrányos. Numerikus szimulációk és tényleges terepi mérések bizonyítják, hogy a földtani felépítésnek a síkhullámnál megjelenő indikációi csökkenően ugyan, de jóval kisebb adó–vevő távolságnál – akár a kívánt kutatási mélység 2–3-szorosánál – is felfedezhetők. Vizsgálataink ezzel a kisebb adó–vevő távolsággal – az átmeneti zónában – végzett frekvenciaszondázás lehetőségeivel foglalkoztak elsősorban a laterális földtani változások kutatása céljából. Lényegében tehát azt vizsgáltuk, hogy mi a határa az adó bipólusa megközelíthetőségének és egy hosszabb tápkábel telepítésénél a lemérhető szelvényszakasz hosszának.

1. Vizsgálatainkba bevontuk az elektromos bipólus elektromágneses terének valamennyi komponensét és a belőlük képzett térerősségarányokat. Földtani információtartalmuk és érzékenységük frekvenciafüggését a szokásosan használt, a távoli és közeli zónára érvényes látszólagos fajlagos ellenállás helyett a teljes frekvenciatartományra számítható látszólagos fajlagos ellenállással elemeztük, amelyet a következőkben *effektív* fajlagos ellenállásnak nevezünk majd. Kiszámítása az egyes térerősség-komponenseket a homogen feltér felszínén leíró, transzcendentális egyenletek numerikus, iterációval történő megoldásán alapszik. Ezek az egyenletek az y irányú elektromos bipólus térerősség-komponenseire az alábbiak:

$$E_\phi = \int_{yB}^{yA} \frac{I \rho \sin(\phi)}{2\pi R^3} [2 - e^{ikR}(1 - ikR)] dy,$$

$$H_R = \int_{yB}^{yA} \frac{I \sin(\phi)}{4\pi R^2} [6I_1(\frac{1}{2}ikR)K_1(\frac{1}{2}ikR) + ikR(I_1(\frac{1}{2}ikR)K_0(\frac{1}{2}ikR) - I_0(\frac{1}{2}ikR)K_1(\frac{1}{2}ikR))] dy,$$

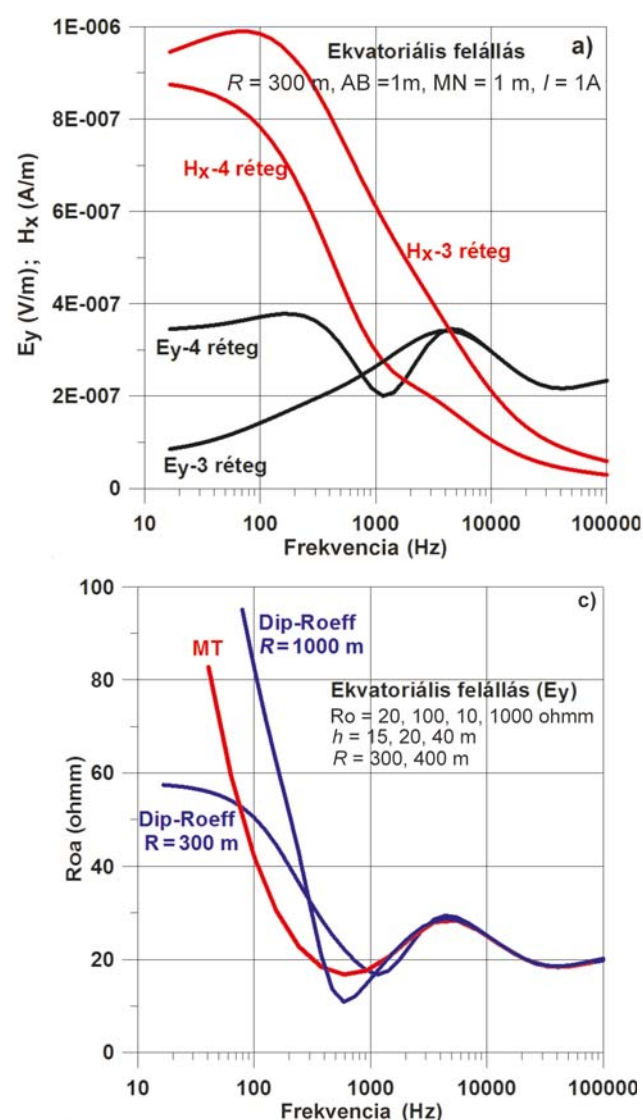
$$H_z = \int_{yB}^{yA} \frac{I \sin(\phi)}{4\pi R^2} \frac{-6}{k^2 R^2} [1 - e^{ikR}(1 - ikR - \frac{1}{3}k^2 R^2)] dy,$$

itt

$$k = \sqrt{i2\pi f \mu / \rho} \quad (\text{hullámszám});$$

$$\sin(\phi) = yv / \sqrt{(yv - y)^2 + xv^2};$$

$$R = \sqrt{(yv - y)^2 + xv^2}.$$



1. ábra 3 és 4 réteges metszetek térerősség-amplitúdó és látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciaszondázási görbéi
Figure 1 Frequency sounding curves of EM field component amplitudes and apparent resistivity over three- and four-layer half-spaces

E_ϕ , H_R , H_z az azimutális elektromos, valamint a radiális és vertikális mágneses komponenseket, I az áramerősséget, $(xA = 0, yA)$, és $(xB = 0, yB)$ a tápelektrodák, xv és yv vevő dipólus koordinátáit, f a frekvenciát, ρ , μ a homogén feltér fajlagos ellenállását és mágneses permeabilitását, I_0 , I_1 , K_0 és K_1 a Bessel-függvényeket jelenti.

A látszólagos fajlagos ellenállásnak ez a definíciója az elemi adó dipólusára, hosszabb tápkábelre, valamint valamennyi térerősség-komponensre és tetszőleges geometriájú mérési elrendezésre egyaránt alkalmazható.

2. Az effektív fajlagos ellenállás használhatóságát az 1. ábra szemlélteti. Az 1.a ábrán 3 és 4 réteges metszetek elektromos dipólusgerjesztésű, horizontális elektromos és mágneses amplitúdó-frekvenciaszondázási görbéi láthatók. Az 1.b ábrán a 3 réteges metszetre számított látszólagos fajlagos ellenállási görbék szerepelnek. Nevezetesen, a dipólusgerjesztésű horizontális elektromos komponensből számított effektív fajlagos ellenállás, Dip-Roeff, továbbá a Cagniard-képlettel a horizontális elektromos és mágneses komponensből számított síkhullámú magnetotellurikus (MT), valamint a dipólusgerjesztéssel kapott Dip-MT-Roa görbe.

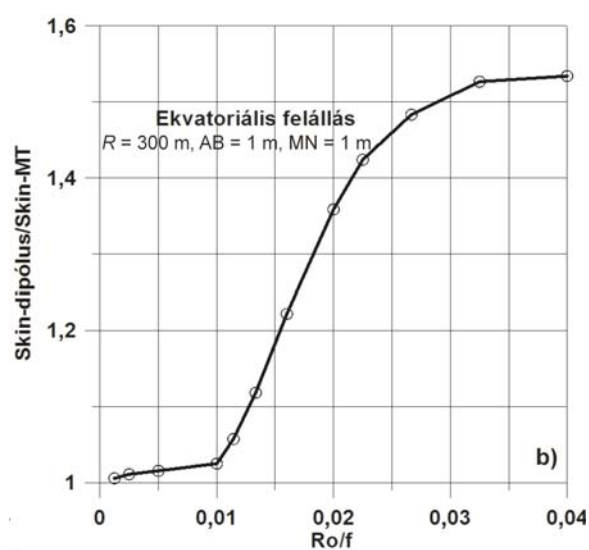
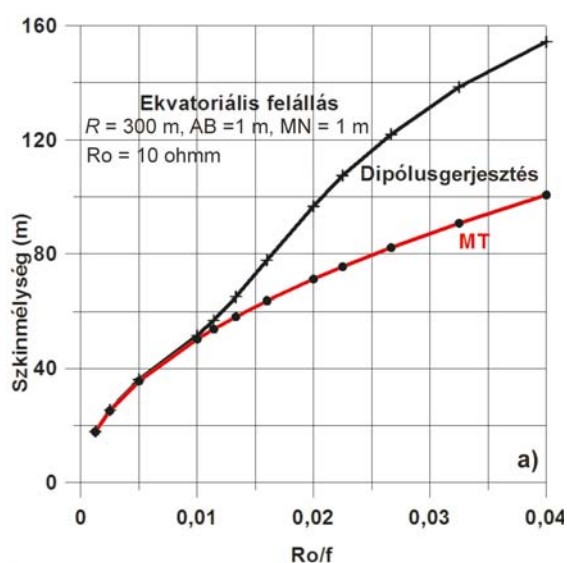
A nagyfrekvenciás szakaszon – mintegy 2000 Hz-ig – a látszólagos fajlagos ellenállási görbék gyakorlatilag együtt futnak. Látható, hogy a dipólusgerjesztésű Dip-MT-Roa görbe a kisfrekvenciás tartományban az adókábel közelsége miatt – $R = 300$ m – előálló, monoton emelkedő szakasza miatt elveszíti földtani információtartalmát. Ezzel szemben a Dip-Roeff görbe még a közbülső zónában – 2000 Hz alatt – is tükrözi a földtani felépítést, mintegy 200 Hz-ig. Ezután a legkisebb frekvenciáknál aszimptotikusan beáll a legnagyobb behatolási mélységet adó egyenáramú szintre. A csupán a horizontális elektromos összetevőt használó mérés – CSAET – tehát a kétkomponenses magnetotellurikus méréssel összhangban levő földtani információt indikál.

Erre utal az 1.c ábra példája is, ahol a négyréteges metszet esetén láthatók az említett látszólagos fajlagos ellenállások görbéi. A nagyfrekvenciás szakaszon – mintegy 2000–3000 Hz-ig – a görbék együtt futnak. Meglepő azonban, hogy az $R = 300$ m adó-vevő távolságnál a bipólusgerjesztésű tér a síkhullámúnál jóval nagyobb frekvencián – 1000 Hz környékén – kezdi érzékelni a nagy ellenállású aljzatot. Az adó-vevő távolságot növelve a rétegződés indikációinak helye a síkhullámú és bipólusgerjesztésű görbékben a frekvenciatengely mentén közeledik egymáshoz. $R = 1000$ m-nél a két görbe már azonos helyen – $f = 500$ –600 Hz – kezdi érzékelni az 1000 ohm-es alsó réteget. Az emelkedő ágak azonban nem esnek egybe és a dipólusgerjesztésnél az ilyen típusú metszetekre jellemző, határozott interferenciás minimum alakul ki.

3. Numerikus modellezéseink szerint az elektromágneses tér átmeneti zónájában egy bizonyos indukciós szám – $(\text{abs}(kR))$ tartományban – vagy adott adó-vevő távolságnál a fajlagos ellenállásfrekvencia arányától függően – a dipólusgerjesztésű elektromos tér „kvázi szkinmélysége” nagyobb, mint a síkhullámú tér szkinmélysége. Ezt mutatja $R = 300$ m-es adó-vevő távolságra a 2.a ábra, ahol a mesterséges áramterű ekvatoriális felállás, valamint a síkhullámú tér szkinmélységének alakulása látható a ρ/f arány függvényében. A 2.b ábrán pedig a szkinmélységek hányadosa szerepel, szintén a ρ/f arány szerint.

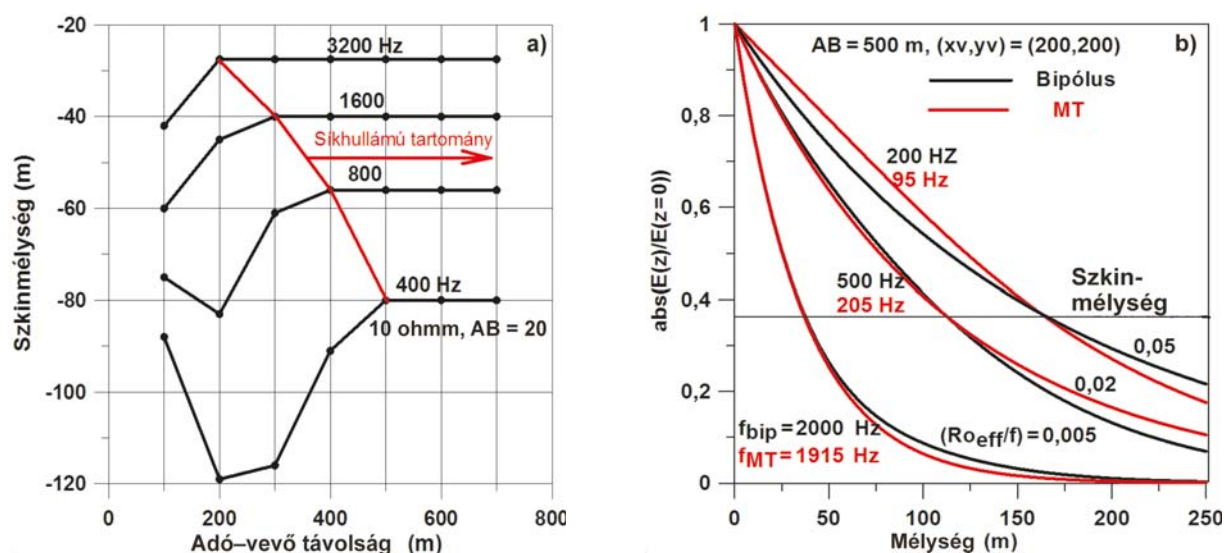
A megnövekedett szkinmélységarányú zóna kialakulását az adó-vevő távolság változásával a 10 ohm-es homogén feltérben néhány frekvenciára a 3.a ábra mutatja be. Hosszabb tápkábelnél, valamint a mérés helyét a tápkábelrel párhuzamosan eltolva, jellege alig változik.

A numerikus modellezések egy további, az átmeneti zónára vonatkozó tanulságát a 3.b ábrarészen mutatjuk be. $(xB, yB) = (0, -250)$, $(xA, yA) = (0, 250)$ és $(xv, yv) = (200, 200)$ koordinátaértékek mellett az adóbipólussal párhuz-



2. ábra A magnetotellurikus és az átmeneti zónabeli dipólus-frekvenciaszondázás szkinmélységének alakulása

Figure 2 Skin depth in the function of the resistivity/frequency ratio for the plane-wave field and for the transition zone of an electric dipole source



3. ábra a) A dipólus-frekvenciasondázás átmeneti és a síkhullámú zónájának határa a 10 ohmm-es feltérben; b) A dipólusgerjesztésű és a síkhullámú elektromos komponensek mélység szerinti változása az átmeneti zónában

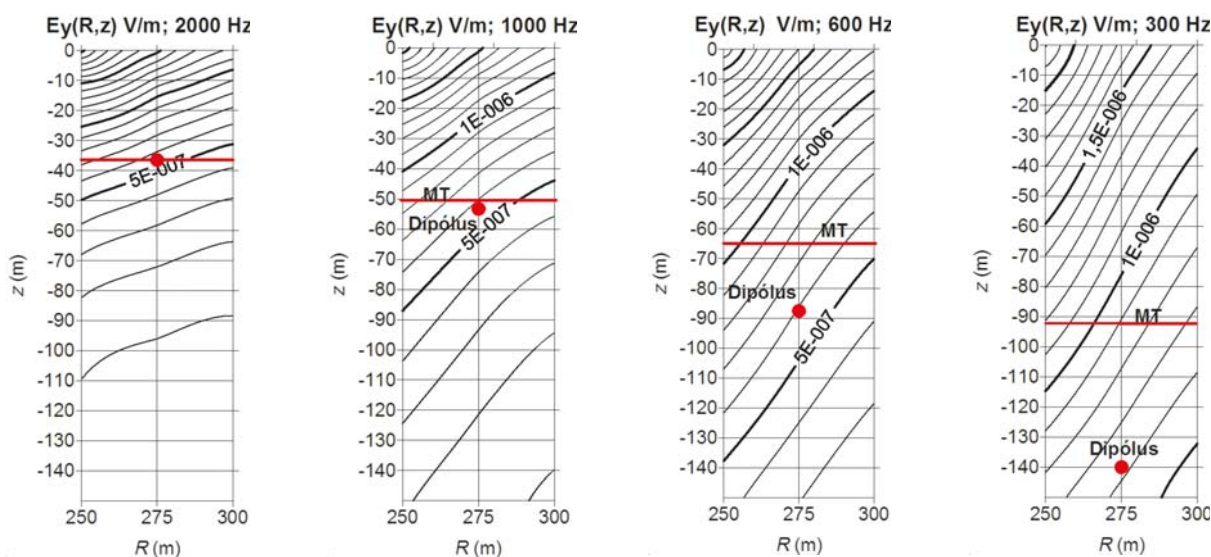
Figure 3 a) The boundary between the transition zone and far-field zone of an electric dipole source for a homogeneous half-space of 10 ohmm; b) Normalized electric field components in the function of depth for plane-wave field and for the transition zone of an electric dipole source

mos és a felszíni értékére normált elektromos komponens mélység szerinti változása látható összevetve az azonos, de eltérő frekvencián előálló szkinmélységű síkhullámú tér hasonlóan normált elektromos komponensével. A két görbe szkinmélység fölötti lefutása a $\rho/f = 0,02$ értékig jól egyezik, a nagyobb értékeknél azután a görbék egyre inkább elválnak. Az elektromos térerősségek hasonló mélységi alakulását adó frekvenciákra az

$$f_{MT} = f_{bip} [\text{szkinm}(\text{bip}) / \text{szkinm}(\text{MT})]^{-2}$$

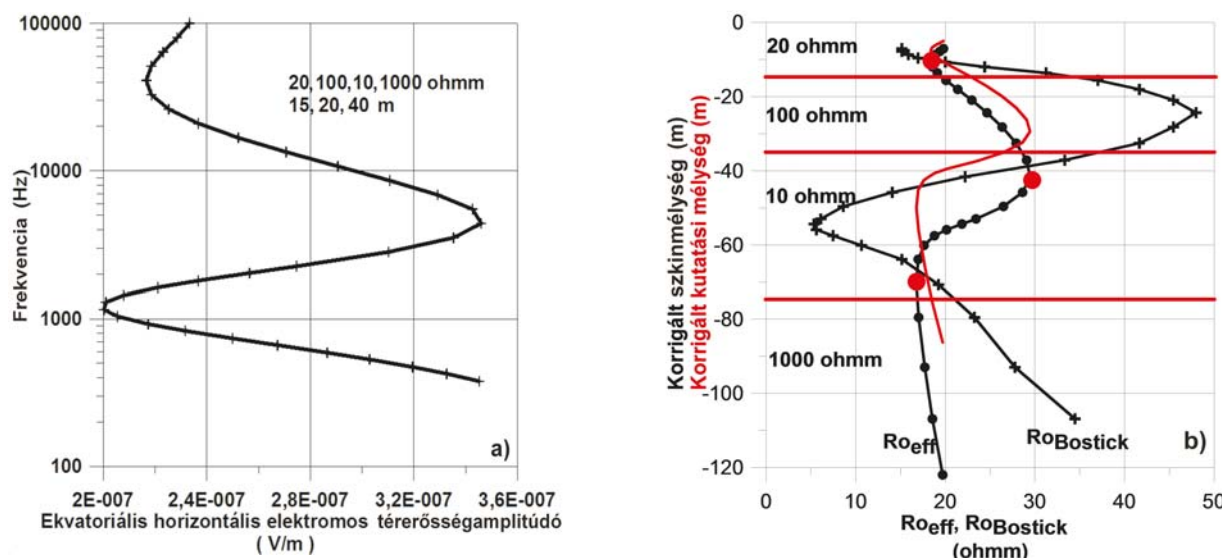
összefüggés teljesül.

Az átmeneti zónára bemutatott sajátságok magyarázatára a közbülső zóna egy szakaszán megvizsgáltuk a 10 ohmm-es feltérben az adódipólussal párhuzamos horizontális elektromos térerősségnek a mélység és az R távolság szerinti alakulását néhány frekvenciára. A 3. ábra szerint az azonos térerősségű felületek a frekvencia csökkenésével fokozódó dőlésűvé válnak, azaz egyre jobban eltérnek a síkhullámú vízszintes helyzethez képest. A dipólusgerjesztésnél emiatt válik mérsékeltébbé a térerősség mélység szerinti csökkenése.



4. ábra A tápkábellel párhuzamos elektromos térerősség azonos amplitúdójú felületeinek metszetei néhány frekvenciára a 10 ohmm-es feltérben

Figure 4 Vertical sections showing the attenuation of electric field component parallel to the source in the function of depth, transmitter-receiver distance and frequency

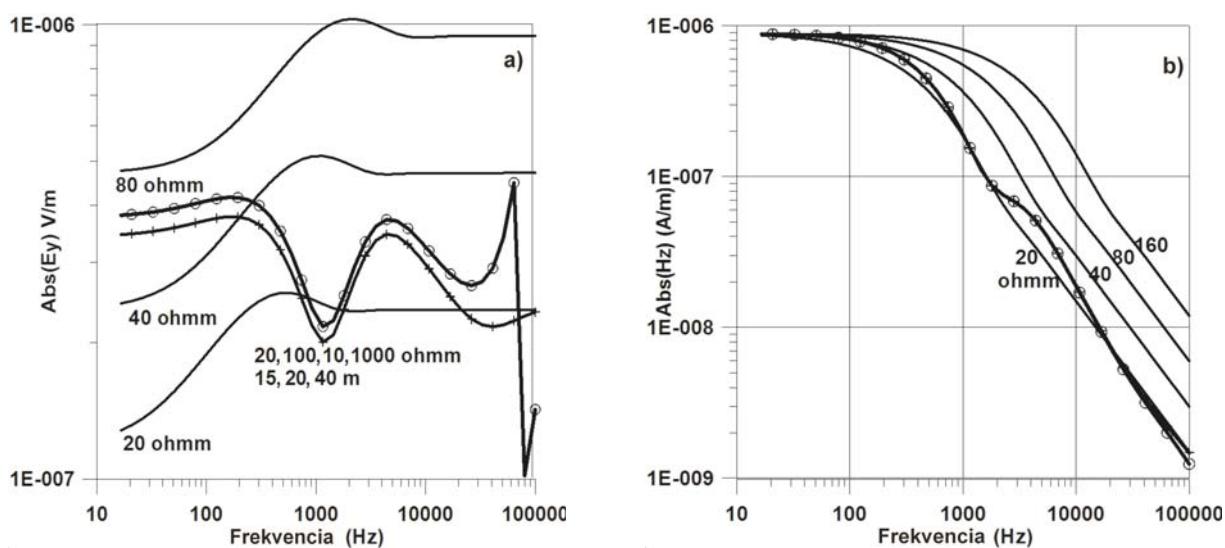


5. ábra | 4 réteges metszet horizontális elektromos frekvenciaszondázási görbéjének frekvencia–mélység transzformációja

Figure 5 | Frequency-depth transformation of the electric field component frequency sounding curve over a four-layer half-space

4. Az átmeneti zóna mérési eredményeinek teljes értékű értelmezése természetesen csak az elektromos bipólus terének direktfeladatát használó inverzióval végezhető el. A bemutatott sajátságok alapján azonban felvetődik a kérdés, hogy első lépésként – a startmodell megadásához, a laterális változások indikálására – a teljes frekvenciasávra vonatkozó látszólagos fajlagos ellenállásokra nem végezhető-e egy becslés jellegű frekvenciamelység-transzformáció. A görbék távoli zónás szakaszára ez a magnetotellurikához hasonlóan kétségtelenül megtehető. A közbülső zónában pedig – pl. a 2.b diagram alapján végzett – korrekció alkalmazásával a síkhullámú szakasz egy meghatározható ρ_{eff}/f értékig (2.b ábra) kiterjeszthető.

A korrekció egy bizonyos frekvenciasávban a bipólus-gerjesztésű mérés effektív fajlagosellenállás-adatainak a frekvenciategyenes menti áthelyezését jelenti azokhoz a kisebb frekvenciaértékekhez, amelyeknél a síkhullámú tér a bipólus terével azonos behatolási mélységű. Ezt a transzformációt az azimutális elektromos komponensből levezetett effektív fajlagos ellenállásra egy másik közleményünkben leírtuk (Takács, Pethő 2008). Ilyen transzformáció eredménye az 5.a ábra, 4 réteges, elektromos amplitúdógörbére pedig az 5.b ábra. Látható, hogy a magnetotellurikában használt $d_i \approx \sqrt{\rho_i^{eff}/2\pi f_{korr,i} \mu_0}$ kutatási mélység függvényében ábrázolt effektív fajlagos ellenállás – piros görbe – csak a nagyfrekvenciás részen mutat reális közelítést.



6. ábra | A horizontális elektromos és vertikális mágneses amplitúdó fajlagosellenállás-érzékenységeinek szemléltetése a frekvenciatartományban

Figure 6 | Demonstration of resistivity resolution of horizontal electric field and vertical magnetic field component frequency sounding curves

Viszont elfogadható becslésnek tekinthetők a korrigált szkinmélység – $p_i = 503 \sqrt{\rho_i^{\text{eff}} / f_{\text{kor}}}$ – függvényében felhorzolt effektív fajlagos ellenállás és egy-egy mélységsávra a Bostick-féle intervallum fajlagosellenállás-görbéinek rétegződésre vonatkozó indikációi. Az utóbbi szélsőértékei az egyes rétegek középvonala táján, az előbbi szélsőértékei pedig a réteghatárok közelében jelennek meg.

5. Az effektív fajlagos ellenállás meghatározásánál használt homogén féltér-karakterisztikák tanulmányozása más vonatkozásban is fontos felvilágosítást adhat. A 6. ábra példája azt mutatja, hogy az egyes térerősség-komponensekből levezetett effektív fajlagos ellenállás „fajlagosellenállás-érzékenysége” a frekvencia függvényében jelentősen eltérhet. Ennek ismerete a kutatások tervezésénél bír jelentőséggel, amennyiben a használt komponens megválasztását a kutatás célja szerint kell elvégezni. Számolni kell azzal is, hogy a komponensek együttes használatánál – pl. impedancia formájában – az érzékenység frekvenciafüggése is módosul. A 6. ábrán az eddig is vizsgált 4 réteges metszet frekvenciaszondázási görbéi, valamint különböző fajlagos ellenállású, homogén féltérrekre az ekvatoriális elektromos és vertikális mágneses térerősségek amplitúdóinak karakterisztikái sze-

repelnek. Látható, hogy a vertikális mágneses komponenshez tartozó effektív fajlagos ellenállás felbontása a kis frekvenciáknál – mintegy 1000 Hz alatt – fokozatosan gyengül, és a legkisebb frekvenciáknál már el is tűnik. A körrel jelölt görbék olyan metszethez tartoznak, amelyben a vevő dipólusa alatt a felső rétegben egy 1000 ohm-es $10 \times 30 \times 10$ m méretű hasáb található. Figyelemre méltó, hogy a felszínhez közeli jelentős inhomogenitás hatása – *static shift* – a vertikális mágneses komponensben alig jelentkezik.

6. Összefoglalásként megállapítható, hogy a T049479 OTKA-téma keretében végzett vizsgálatok szerint az elektromos áram bipólus terének átmeneti zónájában a megfelelően megtervezett frekvenciaszondázási mérésekkel a szokásosnál kisebb adó-vevő távolságoknál is hasznos földtani információk nyerhetők a rétegződésre és a laterális szerkezeti változásokra. A frekvenciasáv alsó határát az a frekvencia jelenti, amelynél a mért térerősség-komponens fajlagosellenállás- és frekvenciafüggése már nem szignifikáns. A mérések tervezésében, értelmezésében, a földtani szerkezeti viszonyok és az elektromágneses tér kapcsolatának tisztázásában jól alkalmazható a teljes frekvenciasávra vonatkozó effektív fajlagos ellenállás.

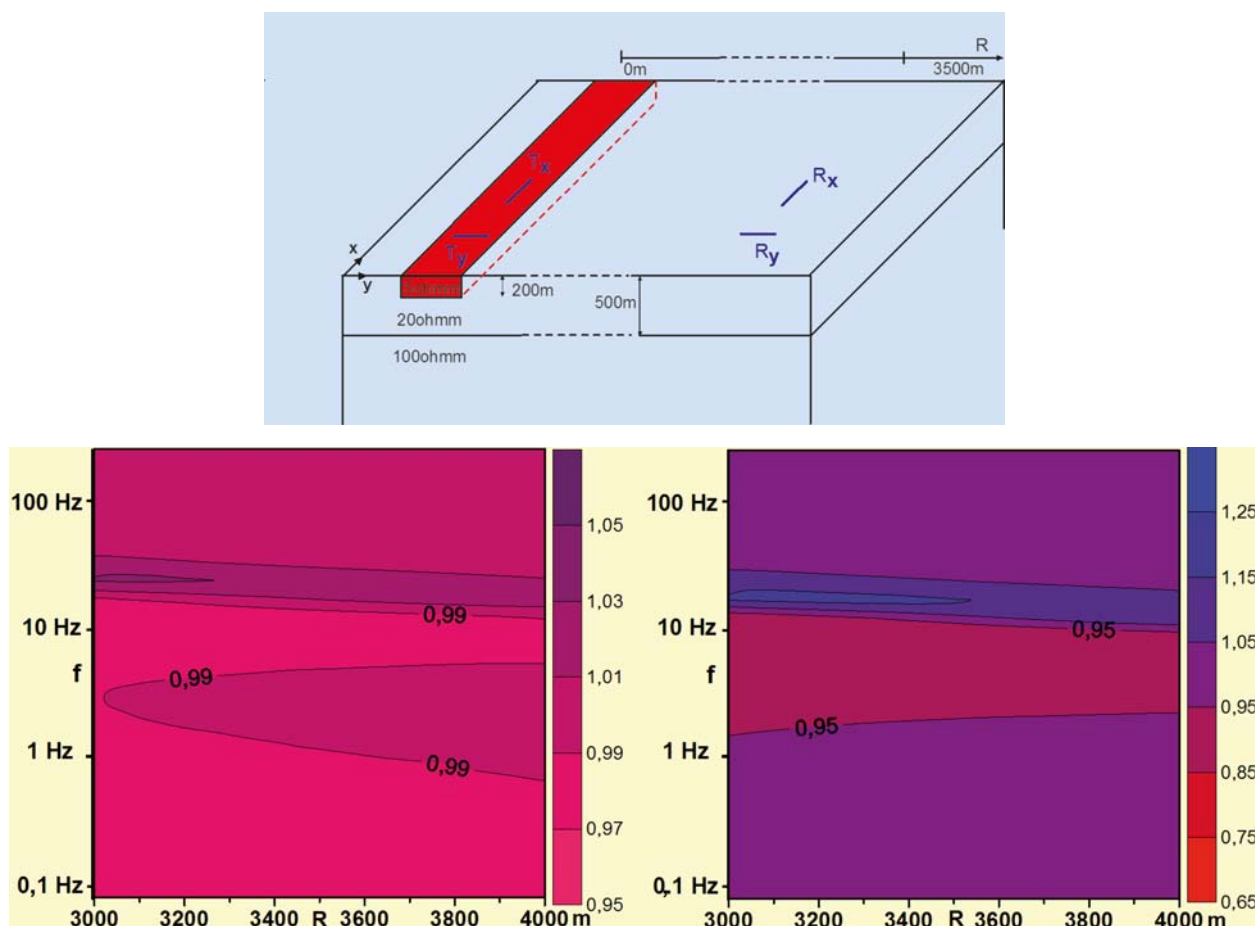
2. 2,5D-s frekvenciatartománybeli elektromágneses numerikus modellezés fejlesztése és modellezési eredmények összegzése^{b)}

A 2,5D-s FEM (frekvenciatartománybeli elektromágneses) véges különbséges programrendszer vonatkozásában algoritmus- és programfejlesztést végeztünk a modellezések pontosságának növelése érdekében, az elektromos dipólusgerjesztést alkalmazó nem csak felszíni mérések szimulációjára és az eltolási áramok figyelembevételével a felszíni mágneses dipólusforrás EM terének meghatározására. További fejlesztéseink arra irányultak, hogy a modellezéseinket PC-s környezetben végezhessük el, másrészt a számítás párhuzamosítási lehetőségeinek vizsgálatát követően a modellezéseinket párhuzamos processzálás (*parallel processing*) keretében valósítsuk meg.

1. A multifrekvenciás 2,5D-s modellezésének megkezdése előtt több *ellenőrzést* végeztünk, mely elsősorban az 1D-s modellezési eredményekkel való összehasonlítást jelentette. A 7. ábra felső részén az inhomogenitás nélküli 2 réteges (1D-s) modellre $268,3 \text{ Hz} \geq f \geq 0,1 \text{ Hz}$ frekvenciatartományban $50 \times 249, 45 \times 180, 42 \times 128$ méretű rácsokat maximum 27 db k_z értéket alkalmazva a térkomponensek amplitúdó eltérése az 1D-s és 2,5D-s kóddal számítva kisebb mint 2,5%, míg a térkomponensek fáziseltérése $1,5^\circ$ -on belüli érték volt. A térbeli hullámszám-tartománybeli mintavételezés szemléltetésére – így a modellezések pontosságnövelése érdekében is – valamennyi számítási pontban a Fourier-transzformált térkomponensek csapásirányú térbeli hullámszámfüggését megadtuk. A modellező rendszer további tesztjét jelentette egy inhomogén modell esetére, a két polarizációra elvégzett Landau-féle felcserélhetőségi vizsgálat.

A felcserélhetőségi vizsgálatot a 7. ábra felső részén látható modellre végeztük el, ugyanazt a rácsgeometriát alkalmazva, mint az 1D-s ellenőrzéseknél. A felcserélhetőségi vizsgálat elvégzése azért lényeges, mert eltérés esetén rávilágíthat többek között a belső vagy külső határfeltételek, a forráskezelési mód, a rácsgeometria és a rácslezárási távolság megválasztásának nem megfelelő voltára. A felcserélhetőségi vizsgálat mind a két módusra 0,7%-on belüli amplitúdóegyezést adott, míg az elektromos térkomponens fázisa $0,2^\circ$ -on belüli egyezést mutatott a teljes frekvenciatartományban (Pethő 2009b).

2. Numerikus modellezéseinket a távoli zónának az átmeneti zónával határos részén, a teljes átmeneti zónában és a kis frekvenciák irányában, vele határos, már frekvenciától független közeli zónában végeztük el különböző modellekre, ami a hullámszám (k) és az adó-vevő távolság (R) szorzatának három nagyságrendnyi változását eredményezte. Azt tapasztaltuk, hogy még ilyen esetben is 3 rácsgeometria használata elégséges. A *rácsgeometria tervezésében* az MT 2D-s modellezésnél szerzett tapasztalatok a mérvadók azzal a megjegyzéssel, hogy az adó dipólus környezetében finomítani kell a rácsgeometriát, másrészt a levegőben lényegesen finomabb rácsközöket kell alkalmazni, mint a síkhullámú 2D-s E-polarizáció esetében. A rácsok közti átmenetet olyan frekvenciára érdemes tervezni, amely nem esik a gerjesztés típusától és modelltől függően a térkomponensek szondázási görbéjén jelentkező *transition notch* (átmeneti zónában jelentkező alullövés) legmeredekebb részére.



7. ábra Adó alatti, jó vezetőképességű inhomogenitással jellemezhető modellre (fent) számított normált impedanciaamplitúdó metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)

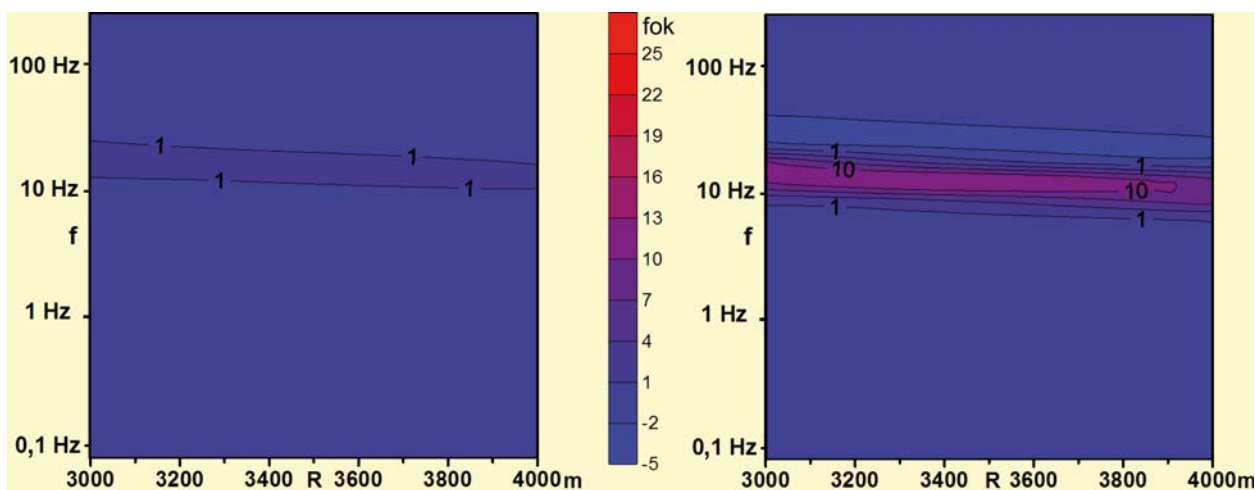
Figure 7 Normalized impedance amplitude section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model with conductive inhomogeneity under the source

A csapásirányú *térbeli hullámszám-* (k_x) tartomány és annak mintavételezésének *tervezésekor* figyelembe vettük, hogy a csapásirányú Fourier-transzformált EM komponensek viselkedése elsősorban az adó-vevő távolságtól, a vizsgált modelltől, a dipólusforrás frekvenciájától, annak típusától, a szerkezeti irányokhoz képesti irányítottságtól, az alkalmazott rács geometriától függ. Az általunk vizsgált modellek esetében 25–29 k_x érték elégségesnek bizonyult, és a logaritmikusan egyenközü mintavételezést (összehasonlító vizsgálatokat követően) preferáltuk a lineárisan egyenközüvel szemben. Ugyanazon modell esetén a nagyobb frekvenciákon elegendő kevesebb k_x értékre megoldani a lineáris egyenletrendszer.

3. A legtöbb, hosszan elnyúlt konduktivitásszerkezet feletti modellezést felszíni elektromos dipólusgerjesztés esetét feltételezve végeztük el. Ezek közül megemlítjük a *távoli zóna átmeneti zónával közvetlenül határos részén* végzett modellezéseinket, melyeket összevetettük a síkhullámú gerjesztés E- és H-polarizációs eredményével egy VLF frekvencián. A modellezések alapján állítható, hogy hosszan elnyúlt szerkeze-

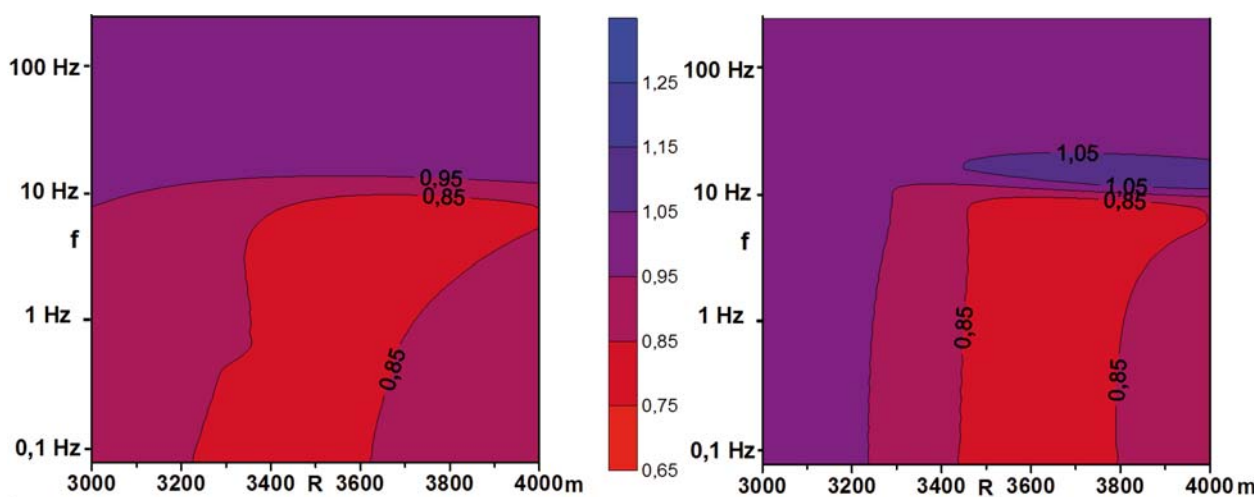
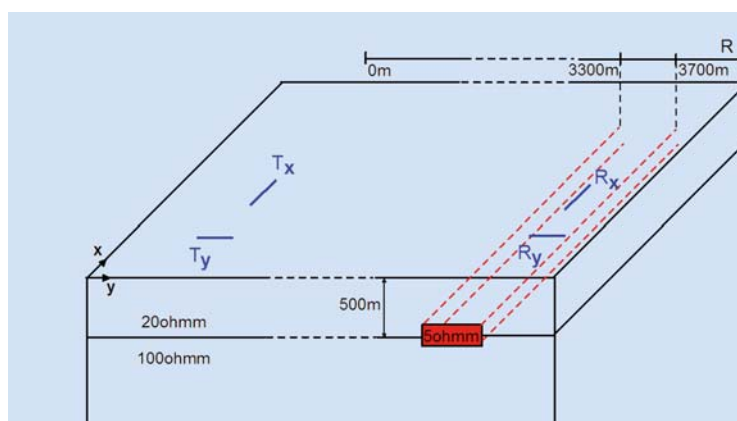
tek esetén a VLF fajlagos ellenállásmérés helyettesíthető elvben pontszerű dipólusgerjesztést alkalmazó CSAMT fajlagos ellenállásméréssel, ha az adó-vevő távolság 6–7 szkinmélységnél nagyobb. Modellezéseink során bemutattuk a csapásirányú elektromos tápdipólus-gerjesztés esetén kialakuló szekunder vertikális mágneses tér dőlés menti változásának szerkezeti indikációkra való felhasználhatóságát is (Pethő 2005, Pethő, Ficsór, Szabó 2006, Németh, Pethő 2009).

4. A 2,5D-s FEM program numerikus inverz Fourier-transzformáció révén határozza meg az adódipólust magában foglaló vertikális síkban a térkomponenseket (Pethő 2007). Ez lehetőséget ad arra, hogy minden egyes térkomponens amplitúdójára és fázisára az adó-vevő távolság és a frekvencia függvényében izovonalas térképet és adott állomásra frekvenciaszondázási görbéket adjunk meg. A mérhető fizikai paraméterek közül laterális lehatárolásra a két polarizációban a *normált impedanciaamplitúdó- és normált impedanciafázis-metszetek* alkalmazását javasoltuk. A normálás itt az inhomogenitás nélküli (1D-s) modellre számított impedanciaértékekre történt (Pethő 2009a, Pethő 2009b).



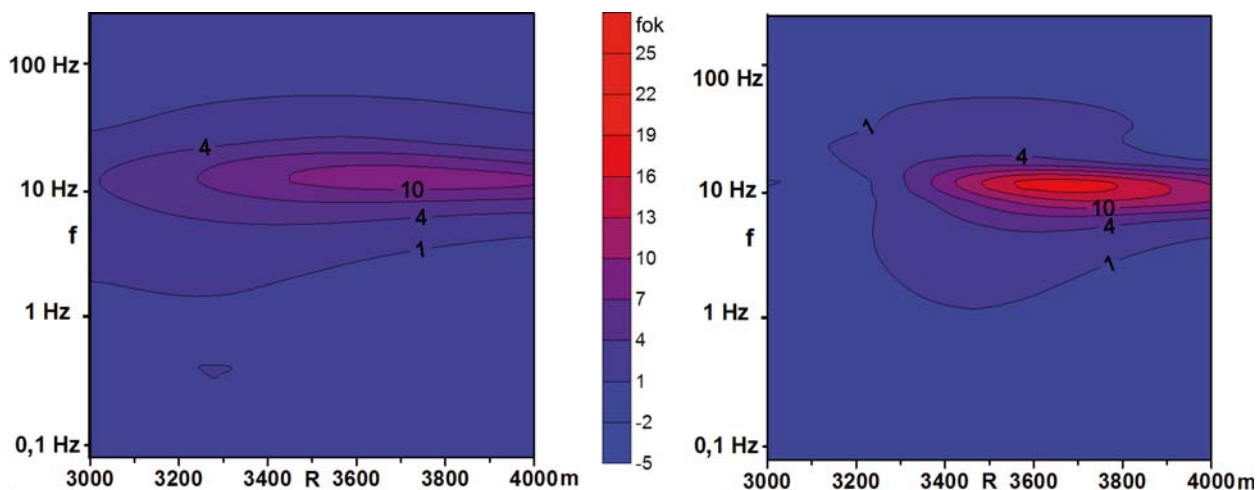
8. ábra A 7. ábra felső részén látható modellre számított normált impedanciafázis metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)

Figure 8 Normalized impedance phase section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model of Fig. 7



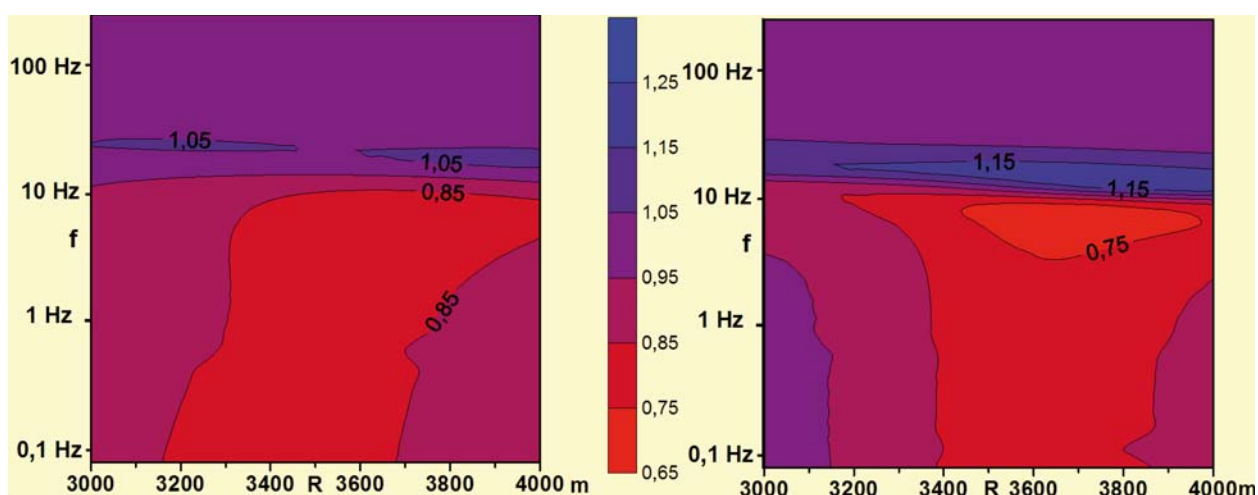
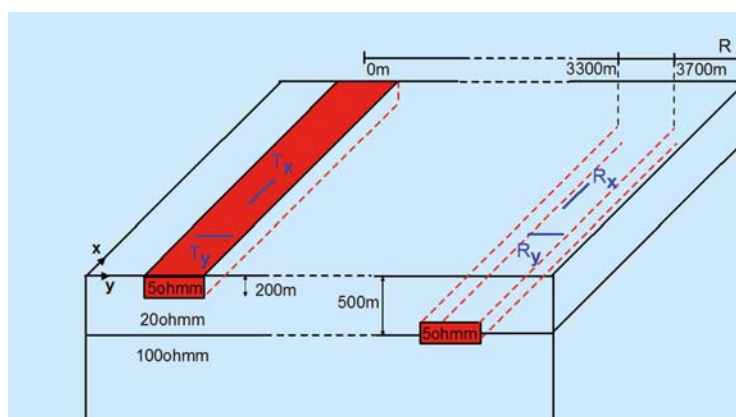
9. ábra Vevő alatti, jó vezetőképességű inhomogenitással jellemezhető modellre (fent) számított normált impedanciaamplitúdó metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)

Figure 9 Normalized impedance amplitude section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model with conductive inhomogeneity under the receiver



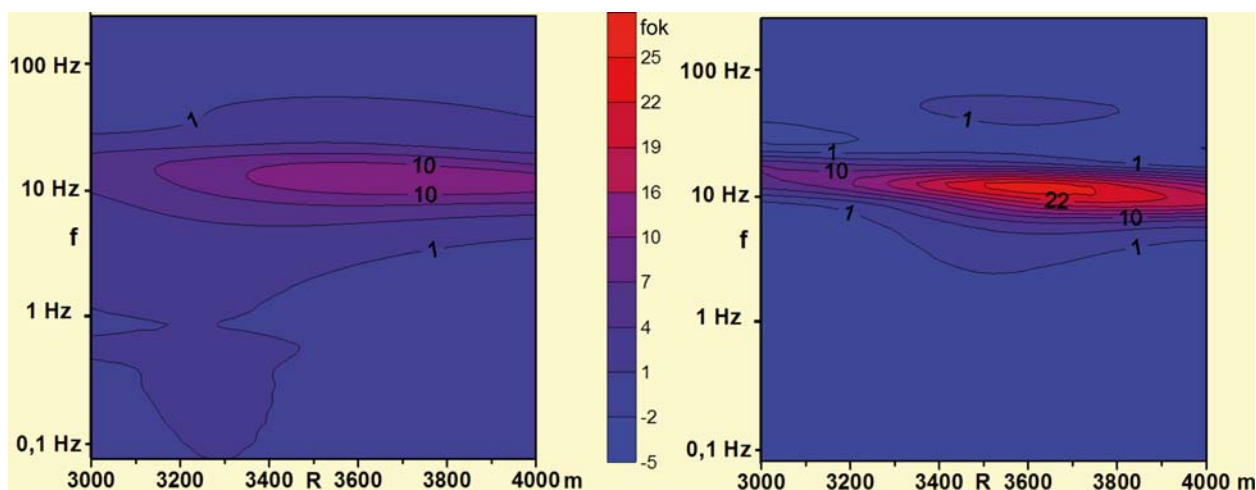
10. ábra | A 9. ábra felső részén látható modellre számított normált impedanciafázis metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)

Figure 10 | Normalized impedance phase section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model of Fig. 9



11. ábra | Adó és vevő alatti, jó vezetőképességű inhomogenitásokkal jellemezhető modellre (fent) számított normált impedanciaamplitúdó metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)

Figure 11 | Normalized impedance amplitude section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model with conductive inhomogeneity under the source and conductive inhomogeneity under the receiver



12. ábra | A 11. ábra felső részén látható modellre számított normált impedanciafázis metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)
Figure 12 | Normalized impedance phase section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model of Fig. 11

A rendelkezésünkre álló MELIS frekvenciaszondázó rendszerrel is lehetőség van különböző mesterséges gerjesztések esetére az impedanciaamplitúdó és impedanciafázis meghatározására. Az átmeneti zónában végzett mérések (Kistokaj) kiértékelésére 1D-s inverziós programot fejlesztettünk ki. Az inverziós program a Melis által meghatározott mérési hibákat veszi figyelembe. Lehetőség van a két mérési elrendezés (dipól axiális és dipól ekvatoriális) impedanciaamplitúdó és impedanciafázis eredményeinek külön-külön, és együttes inverziójára is tetszőleges kombinációban. E mérések együttes inverziós kiértékelése is rávilágított a forrás környezetében lévő inhomogenitások EM tértorzító hatására. Az adó környezetében elhelyezkedő felszíni és a vevő környezetében lévő felszín alatti inhomogenitás, továbbá ezek kombinációjaként jelentkező inhomogenitások EM tértorzító hatását és a vevő alatti szerkezet kimutathatóságát mutatjuk be a következő részben.

A *forrás polarizációs hatása (source polarization effect)* abban nyilvánul meg, hogy a TE és TM módusban a galvanikus és az áramcsatornázási hatások eltérő mértéke miatt az EM térkomponensek és az azokból származtatott mennyiségek frekvenciaszondázási görbéi a két mérési elrendezésben eltérnek. Valójában az említett hatások torzítják a már 1D-s környezetben is eltérést mutató dipól ekvatoriális és dipól axiális elrendezésű EM szondázási görbéket. A *forrásáthatás (source overprint)* jelensége akkor jelentkezik markánsan, ha közvetlenül a gerjesztő dipólus alatt helyezkedik el a vezetőképesség-inhomogenitás. Ennek hatását a forrástól nagyobb távolságok mellett is érzékelni lehet, bár hatása az adó-vevő távolságával csökken. Másik jellemzője, hogy az *offset* növelésével ez a hatás egyre kisebb frekvencián jelenik meg. Épp ezért gyakran nem is különböztetik meg az *árnyékhatástól (shadow effect)*, mely a forrás és vevő által átvilágított tértartományban lévő jó vezető jelenléte miatt alakul ki, ugyanis az inhomogenitásban az EM tér csillapodása nagyobb mértékű, mint az inhomogenitáson kívül. A 7–8. ábrán a forrásáthatást szemléltetjük a két po-

larizációra vonatkozólag, a vevők alatt kétréteges feltér feltételezésével. A hatás a TM módusznál (T_y-R_y elrendezés mellett) erőteljesebben jelentkezik, mint TE módusban (T_x-R_x elrendezés). A normálás itt és a további esetekben is az inhomogenitás nélküli (1D-s) modellre számított impedanciaamplitúdó és impedanciafázis értékekre történt, az amplitúdónál hányados-, a fázisnál különbségképzést jelent.

Megvizsgáltuk a vevő alatt elhelyezkedő inhomogenitás kimutathatóságát adó alatti inhomogenitás nélküli esetben (9. és 10. ábra), továbbá *source overprint* feltételezésével (11. és 12. ábra) is.

A vevő alatti jó vezető beágyazódási modellje esetén (9. ábra felső részén lévő modell) a normált impedancia-metszeteken a forráspolarizációs hatás és az árnyékhatás jelentkezik. TE módusznál az áramcsatornázás, míg TM módusznál az áramfolyás irányára merőleges felületeken kialakuló elektromos töltésfelhalmozódás miatt alakul ki a homogén, kétréteges feltér impedanciájához képest megfigyelt csökkenés. Az árnyékhatás a normált impedanciaamplitúdó metszetein mind a két polarizációnál a nagyobb frekvenciákon szignifikánsabban jelentkezik, mint a kisebb frekvenciákon, és az árnyékhatás még szembetűnőbb a normált impedanciafázis metszetein: a legnagyobb fáziseltérésű helyek inkább az inhomogenitásnak az adódipólussal ellentétes oldala felett alakulnak ki, mint az inhomogenitás középpontja felett. A fáziseltérések a két polarizációra nézve azonos előjelűek. A TM módus mind az amplitúdó-, mind a fázismetszeten jobban leképezi a vizsgált inhomogenitást.

Végül, a 11. ábra felső részén látható modell mutatja azt az esetet, amikor az adó alatt közvetlenül egy elsősorban forrásáthatást, míg a vevő alatt 500 m-rel egy elsősorban árnyékhatást okozó jó vezetőképességű inhomogenitás található. A normált impedancia-metszeteken jól látható, hogy a vevő alatti jó vezető inhomogenitása okozta impedancia-változás a *source overprint* hatás miatt elkenten jelentkezik, ugyanakkor mivel mind a két inhomogenitás a környezeté-

hez képest jobban vezet, ezért impedanciaamplitúdó-csökkenés és impedanciafázis-növekedés figyelhető meg a 7. és 8. ábrán látható normált metszetekhez képest. A hatások szuperpozíciója eredményeként a normált metszeteken az

inhomogenitás egyszerre nagyobb relatív változással, ugyanakkor a forrásáthatás miatt elkentebben jelentkezik. Különösen érvényes ez a TM módusra, ahol a forrásáthatás szignifikánsabb.

3. Átmeneti zónában elvégzett mérések, különös tekintettel a távvezetékek EM terének geofizikai alkalmazhatóságára^{c)}

Homogén feltér felett a három fázisvezetékű távvezeték szimmetrikus, majd aszimmetrikus terhelését feltételezve megállapítottuk, hogy a távvezeték nyomvonalától számítva 4–5, míg az aszimmetrikus esetben 5–6 szkinmélységnél nagyobb távolságoknál a Cagniard-féle formula alkalmazható a látszólagos fajlagos ellenállás meghatározására. A modellezések és a terepi mérések azt is bizonyították, hogy az ennél kisebb távolságoknál – azaz az átmeneti zónában – a bemeneti impedanciának a távoli zónához hasonlóan földtani információtartalma van. A földtani információk az egyes térerősség-komponensekben a vezetékek elrendeződésétől, a vezetékek közötti árameloszlástól és a vezetéktől mért távolságtól függően jelennek meg. Két tanulmányunkban – Takács, Pethő (2006) és Pethő, Takács (2007) – terepi példákkal is bizonyítjuk ennek az 50 Hz-s eljárásnak a földtani alkalmazhatóságát. Saját eszközeinkből többféle mérőrendszert állítottunk össze. Ezekkel kísérleti terepi méréseket végeztünk két területen. A távvezetékekkel párhuzamos elektromos térkomponens alapharmonikusának vizsgálatával az egyik esetben egy vető nyomvonalának térképezését (Múcsony környéke), a másik területen (Sajókaza mellett) az 50 Hz és annak felharmonikusainak mérésével 50–150 m-es üledékekkel fedett mészkőgerinc laterális lehatárolását végeztük el.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti az Országos Tudományos Kutatási Alapot, hogy az „Inhomogenitások lehatárolása elektromágneses frekvenciaszondázások alapján” című kutatási témát a T049479. számú pályázat keretében támogatta.

Jegyzetek

^{a)} Az 1. fejezet Takács Ernő munkája

^{b)} A 2. fejezet Pethő Gábor, Ficsor Lajos és Szabó István munkája

^{c)} A 3. fejezet Takács Ernő és Pethő Gábor munkája

Hivatkozások

- Németh N., Pethő G., 2009: Geological mapping by geobotanical and geophysical means: a case study from the Bükk Mountains (NE Hungary). Central European Journal of Geosciences, Versita, Warsaw 1/1 84–94
- Pethő G., 2005: Formalism comparison of 2-D MT and 2.5D FEM using electric dipole source, microCAD 2005 International Scientific Conference, Section C: Geology & Mineral Resources, Miskolc, pp. 31–36

Pethő G., 2007: EM parameters of 2.5-D FEM using electric dipole source in the transition zone. Presented in Intellectual Service for Oil & Gas Industry, Analysis, solutions, perspectives. Published by MU & USPTU, Miskolc, ISBN 978-963-661-761-5, Vol. 4, pp. 110–117

Pethő G. 2009a: Numerical modelling of CSAMT source effects for elongated conductivity structures, 11th Scientific Assembly of International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Sopron, iaga_abstract\DIV1\107-WED-O1345-0452.pdf

Pethő G. 2009b: FEM source effect investigation with 2.5D numerical modelling, 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface 2009 Proceedings & Exhibitors' Catalogue, Dublin, p.59

Pethő G., Ficsor L., Szabó I., 2006: Comparison of 2-D VLF and 2.5-D HED's far field regime EM fields, microCAD 2006 International Scientific Conference, Section B: Geoinformatics Spatial Informatics & Mineral Resources, Miskolc, pp. 35–40

Pethő G., Takács E., 2007: Geophysical Application of Power Lines EM fields. 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, Extended Abstract, p. 25

Takács E., Pethő G., 2006: Újabb vizsgálatok a villamos távvezetékek terének geofizikai alkalmazhatóságára. Magyar Geofizika 47/1 20–26

Takács E., Pethő G., 2008: Information-content of the electric bipole source frequency sounding curves in the transition zone. Acta Geod. Geoph. Hung. 43/4, 369–381

Az OTKA támogatásával megjelent további, a hivatkozásokban nem szereplő publikációk:

Ficsor L., Pethő G., Tóth A., 2008a: Gridification of a geophysical electromagnetic modelling system, microCAD 2008 International Scientific Conference, Miskolc, Section O: Applied Information Engineering, pp. 43–48

Ficsor L., Pethő G., Tóth A., 2008b: Upgrading 2.5-D FD modelling by parallelisation, microCAD 2008 International Scientific Conference, Miskolc, Section O: Applied Information Engineering, pp. 37–42

Takács E., 2009: Layer-discontinuity indications in the induction response of EM transillumination measurement. 11th Scientific Assembly of International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Sopron, iaga_abstract\DIV1\104-THU-P1610-0540.pdf

Tóth A., Ficsor L., Pethő G., 2007: WP4: Applications Progress Report, FEM2.5D/2.5 Dimensional Frequency Domain Electromagnetic Numerical Modeling, SEE-GRID-2, 5th PSC (Project Steering Committee) Meeting, Thessaloniki

Tóth A., Ficsor L., Pethő G., 2009: FEM 2.5-D – Egy geofizikai elektromágneses numerikus modellező rendszer megvalósítása a GRID-ben. Networkshop 2009 Konferencia CD, Szeged

Vass P., Dobróka, M. 2009: Sorfejtéses inverzió – Fourier-transzformáció mint inverz feladat. Magyar Geofizika 50/4, 141–152

A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c. K49604. sz. OTKA-projekt eredményeiből

SZALAI S., VARGA M., NOVÁK A., SZARKA L.

A Magyar Tudományos Akadémia Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézete, H-9400 Sopron, Csatka u. 6–8.
E-mail: szalai@ggki.hu, vargalm@monornet.hu, novak@ggki.hu, szarka@ggki.hu

A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c. OTKA keretében olyan geoelektromos elrendezések szisztematikus vizsgálatát vállaltuk, amelyeket vagy egyáltalán nem használtak még a gyakorlati kutatások során, vagy amelyeket használtak ugyan néhány alkalommal, de aztán elfeledték őket. Az elrendezések áttekintése érdekében először összegyűjtöttük az összes, valaha használt geoelektromos elrendezést, egységes módon ábráztuk és rendszereztuk azokat. Megvizsgáltuk, hogy milyen motiváció volt az egyes elrendezések kialakításának háttérében, és hogy az egyes elrendezések létrehozása során alkalmazott stratégiák alkalmazhatók-e a multielektrodás mérésekben. Megadtuk a tetszőleges felszíni elektróda-elrendezések paraméterérzékenység-térképeinek (PÉT) számításához szükséges képletet, és segítségével elkészítettük az összes olyan elrendezés paraméterérzékenység térképeit (PÉT), amelyeknél ez lehetséges. Példákkal illusztráltuk e térképek használhatóságát. Kiszámítottuk 30 elrendezés Roy és Apparao-, és Edwards-féle kutatási mélység értékét, az egyes elrendezések vertikális felbontóképességét, a kutatási mélységértékek és a felbontóképességi értékek viszonyát egymáshoz, valamint a kutatási mélység és a zajok viszonyát. Megállapítottuk 6 elrendezés egyes modellekre vonatkozó ún. kimutathatósági mélységértékeit különböző zajszintek feltételezésével. Ezek az elméleti vizsgálatok adtak alapot a terepi mérések megfelelő megtervezéséhez és kivitelezéséhez, melyek során elsőként lemértük az elektródák különböző terepi körülmények között várható pozicionálási hibáit, és kiszámítottuk az ebből eredő hibák hatását különböző sokelektrodás elrendezések esetére. Később tenzorális geoelektromos régészeti méréseket végeztünk, majd teszteltük a 3D elektromos tomográfia lehetőségeit aknák kimutatására különböző talajviszonyok között és különböző mélységekben. Kidolgoztunk egy eljárást többirányú repedésrendszerek kutatására. Kifejlesztettük az ún. szűrőpróba-lejárást, és bizonyítottuk annak használhatóságát régészeti kutatásokban. Ez a cikk csak illusztrálja kutatási eredményeinket, azok részletei a hivatkozott publikációkban lelhetők fel.

Szalai, S., Varga, M., Novák, A., Szarka, L.: From the results of the OTKA project “Non-conventional geoelectric arrays” K49604

In the frame of the OTKA project “Non-conventional geoelectric arrays” we systematically investigated geoelectric arrays which has never been applied in the field measurements before or which has been applied, but later forgotten. In order to have an overview over all ever used geoelectric arrays we collected, classified and presented them in a unified way. It was investigated as well, which strategies were behind the development of these arrays and whether these strategies could be used in the future multielectrode investigations. We derived an equation to calculate parameter-sensitivity maps for arbitrary surface geoelectric arrays and all these maps were presented. We illustrated the usefulness of these maps through examples. We calculated furthermore the Roy and Apparao-, and Edwards-type depth of detection values for 30 different arrays, the resolution values of these arrays, the relation between the depth of investigation values and those of the resolution values and the relation between the depth of investigation values and the noise level, as well. Moreover, we give here the so-called depth of detectability values of 6 arrays for different models assuming different noise levels. The aforementioned theoretical investigations served as a basis for planning the field measurements. First of all, the real positioning errors were measured under different field conditions and the effect of this error type in the case of different multielectrode arrays was calculated. Tensorial geoelectric measurements were carried out, as well. We tested the applicability of 3D electrical resistivity tomography technique to detect landmines in different soil conditions and at various depths. We elaborated moreover a geoelectrical procedure which is able to map multidirectional fissure systems. We presented the so-called standardized pricking probe surveying technique and demonstrated its usefulness in an archaeological study. It should be mentioned, that this paper does not contain details. If the reader would like to reproduce the results demonstrated on the figures, the referred previous publications of the authors should be studied.

Beérkezett: 2010. december 14.; *elfogadva:* 2011. február 22.

Eredményeinkből

1. Az összes valaha használt elrendezés összegyűjtése és osztályozása

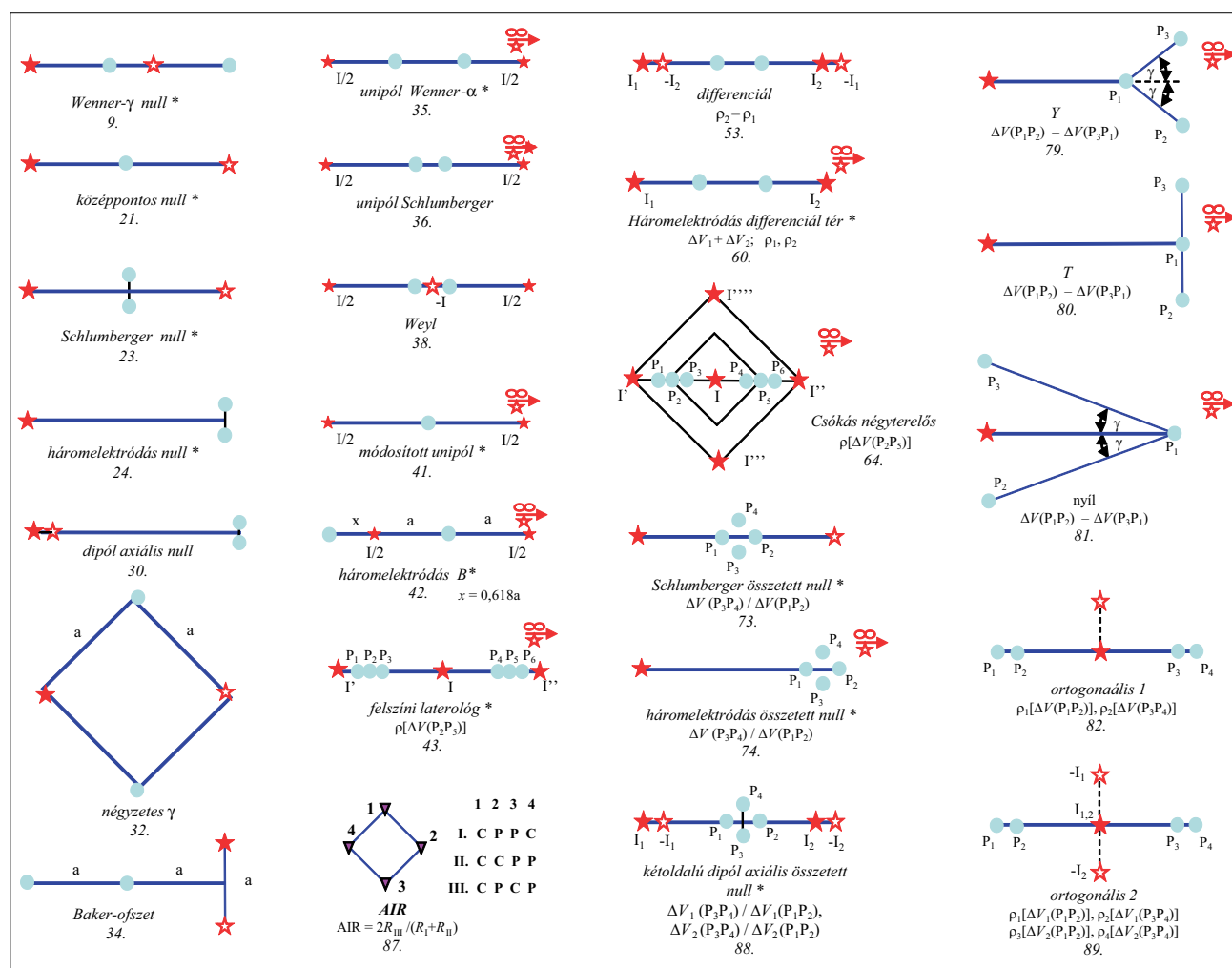
Annak érdekében, hogy nem konvencionális elrendezéseinket el tudjuk helyezni az összes eddig használt elrendezés között, valamint hogy lássuk, milyen hasonló elrendezéseket hoztak létre korábban, milyen elrendezésekkel próbálták elérni azokat a célokat, amelyeket mi is kitűztünk maguk elé, és hogy elrendezéseinket majd a többi elrendezéssel vagy azok egy csoportjával összehasonlíthassuk, összegyűjtöttük és osztályoztuk az összes az angol és az orosz nyelvű szakirodalomban megjelent eddig használt elrendezést (Szalai, Szarka 2007a, Szalai, Szarka 2008a). Összesen 92 + 10 db elrendezést gyűjtöttünk össze és ábrázoltunk egységes jelölésrendszerrel, valamint megadtuk az egyes elrendezések szakirodalmi forrásait. Az elrendezések osztályozása 3 paraméter alapján történt, és így mindösszesen 2^3 csoportot képeztünk az összes elrendezésből. Példaként az egyes

csoportokon átívelő elrendezések, az ún. nullelrendezések halmazát mutatjuk be (1. ábra), melyek vizsgálata kutatásunk egyik fő irányát jelentette.

Ez az elrendezésgyűjtemény képezte az alapját számos további – elsősorban összehasonlító – vizsgálatnak.

2. A felszíni elektródaelrendezések megalkotásánál alkalmazott stratégiák

A fenti gyűjtemény szolgált alapjául az egyes elrendezések között lévő, különböző összefüggések megvilágításának, illetve annak, hogy lássuk, azok milyen célok által vezérelve jöttek létre. A fő célokat négy csoportba sorolhatjuk, és azon belül 11 alstratégiát különíthetünk el (1. táblázat). Megállapítottuk, hogy új elrendezések létrehozását leggyakrabban praktikus okok motiválták (61 ilyen elrendezést találtunk), mint pl. hogy kevesebb elektródát kelljen mozgatni a mérés során, vagy hogy a mért jel a lehető legnagyobb legyen. Szintén fontos szempont volt az új elrendezések létrehozásánál, hogy azok a lokális inhomogenitásokra, illetve az



1. ábra A 2a nullelrendezések alstratégiáinak megfelelő elrendezések. A teli csillagok a forrás-, az üresek a nyelő áramelektrodákat, a körök a potenciálelektrodákat jelölik

Figure 1 Solution techniques 2a ("Null arrays"). Source/sink electrodes are full/empty stars. Full circles: potential electrodes

1. táblázat | Geoelektromos elrendezések kialakítása során alkalmazott stratégiák

Általános megfontolás (stratégia)	Cél	Megoldás (alstratégia)	Elrendezések száma	
Praktikus okok (1.)	A jel növelése	C közelíti P-t – (1a)	9	61
	Kevesebb elektródát kell mozgatni	C és/vagy P a végtelenben – (1b)	21	
	Kevesebb kábel szükséges	Dipól – (1c)	13	
	Nem kell minden elektródát mozgatni a térképezéshez	Nem minden elektróda mozog – (1d)	10	
	Korlátozott hozzáférésű területen végrehajtandó mérés	Aszimmetrikus – (1e)	8	
Az anomália „megtisztítása” magával a mérési módszerrel (2.)	„Tiszta” anomáliát kapjunk	Null – (2a)	25	36
	A felszín közeli inhomogenitások hatásának kiküszöbölése	Ofszet – (2b)	2	
		Differencia – (2c)	2	
		Kétoldalú – (2d)	5	
		Az elektródák identitása változik – (2e)	2	
A helyi inhomogenitás és/vagy anizotrópia tanulmányozása (3.)	x irányú (szelvényirány-) változások	Lee típusú – (3a)	3	54
		Deriváló – (3b)	12	
	y irányú változások	Vektor – (3c)	5	
		Tenzor – (3d)	5	
		További nem vonal elrendezések – (3e)	16	
	z (függőleges) irányú változások	Miniszondázás – (3f)	11	
		Mélyégi differenciálás – (3g)	2	
A kutatási mélység növelése (4.)	A kutatási mélység növelése	Fókuszálás – (4)	17	17

anizotrópiára érzékenyek legyenek (54 elrendezés). Ezek az elrendezések ugyanakkor az előbbieknél ritkábban használatosak a terepen, inkább speciális esetekben alkalmazzák ezeket. Sok (36) olyan elrendezést is találtunk, amelyek célja magának a mérési procedúrának segítségével megszabadulni a geofizikus számára hasznos információt nem szolgáltató, azaz zajként értelmezhető geológiai eredetű információktól.

Utóbbiak közül ráadásul meglepően nagyszámú (25) a nullelrendezések csoportja (1. ábra). Jól láthatóan tehát számos próbálkozás történt már a nullelrendezések használatára (példák Szalai és Szarka 2008a-ban) és ezek jelentős része sikeres is volt, de használatuk – elsősorban terepi kivitelezésük bonyolultságának következtében – nem terjedt el. Ezért tűnt célszerűnek olyan nullelrendezések vizsgálata, amelyek terepi körülmények között is könnyen alkalmazhatók (Szalai et al. 2002). Mivel azonban nemlineáris voltuk miatt még ezek használata is viszonylag körülményes, és mivel a napjainkra rendkívül elterjedt 2D sokelektrodás rendszerekbe nem építhetők be, további geometriai (azaz nem fókuszált, nem *superposed*) nullelrendezéseket kellett keresnünk és vizsgálnunk. A két vizsgált ilyen elrendezés, a Wenner- γ -, null- és a MAN-elrendezés közül a MAN, vagy

más néven középpontos nullelrendezés tűnik reménykeltőbbnek.

Az utolsó „stratégiai” csoport, amely eredetileg a kutatási mélység növelését célozta meg, azért említésre méltó esetünkben, mert az ott alkalmazandó technikát, az áramfókuszálást szintén vizsgáltuk jelen OTKA keretében. El akarván azonban kerülni ebben az esetben is a bonyolult terepi procedúrát, az áram fókuszálását szintetikusán végeztük, úgy állítva be az egyes áramelektrodák által kibocsátott áram erősségét, hogy az áramvonalak a számunkra érdekes helyeken függőlegesen lefelé irányuljanak.

Az egyes elrendezések között érdekes összefüggések tárhatóak fel. Bemutattuk, hogy egyes elrendezésekből kiindulva hogyan juthatunk el 1, 2 vagy 3 lépésben, azaz ennyi tulajdonság megváltoztatásával különböző, már használt elrendezésekhez (Szalai, Szarka 2007b). A Schlumberger „család” az anyaelrendezéssel együtt 20, a dipól axiális elrendezés családja 21, míg a pole-dipole elrendezés családja pl. 19 elrendezést foglal magában az ismert elrendezések közül, azaz ez a három elrendezéscsalád az összes ismert elrendezés mintegy 60%-át fedi le.

Megvizsgáltuk azt is, hogy mely stratégiák multielektrodás rendszerekbe történő integrálása lehet a legered-

ményesebb. A legcélszerűbbnek azon elrendezések multielektrodás rendszerekbe történő integrálása látszik, amelyek segítségével annak kutatási mélysége, vagy felbontóképessége megnövelhető lehet. A kutatási mélység növekedése valamely elektróda végtelenbe távolításától (1b. alstratégia), vagy a nullelrendezések alkalmazásától (2a.) várható leginkább. A nullelrendezésekre vonatkozó ezen állításunkat numerikus modellezési vizsgálatok (Szalai et al. 2005a), a jelen OTKA keretében elvégzett analóg modellezési vizsgálatok és terepi vizsgálatok (Szalai et al. 2002) támasztják alá.

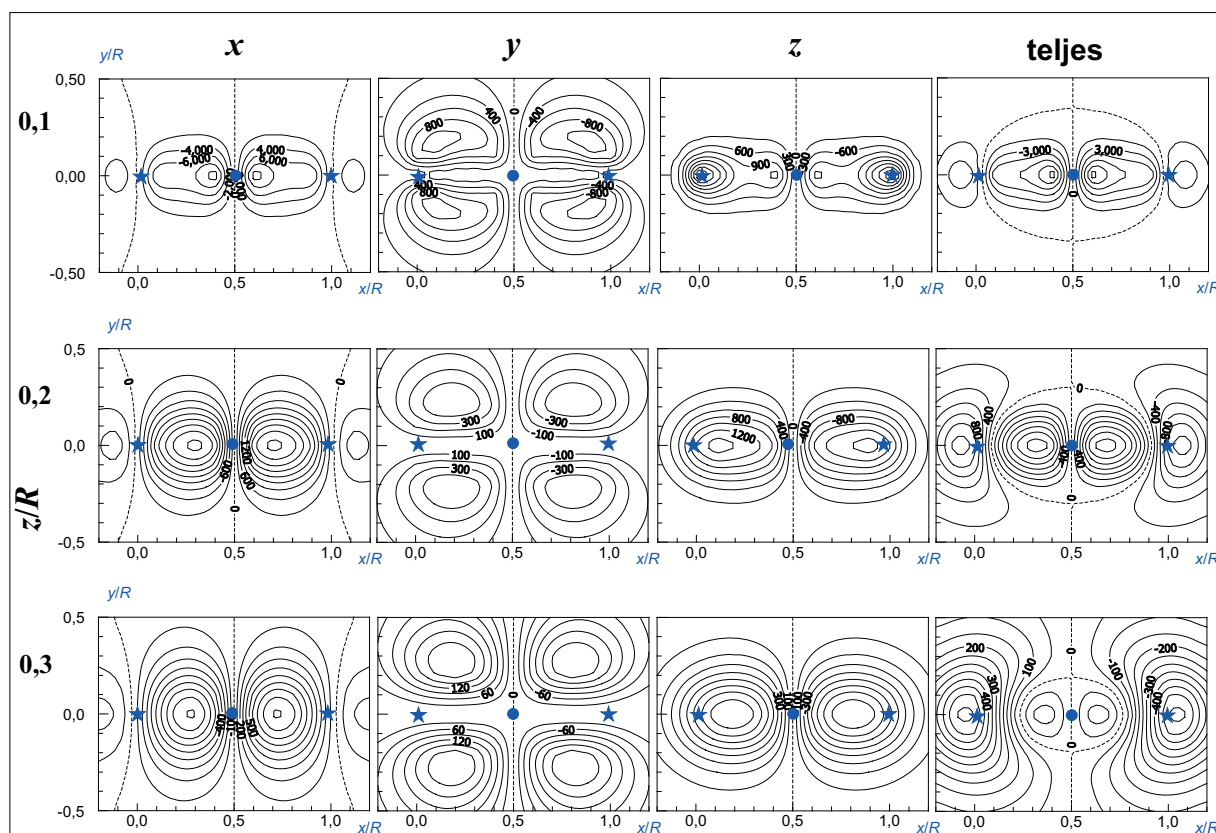
A vertikális felbontóképesség növekedése az áram-, és a potenciálelektrodák egymáshoz közelítésétől (1a.) várható leginkább (Szalai et al. 2009c), míg a horizontális felbontóképesség a deriválási stratégiát követve (3b.) növelhető a legnagyobb valószínűséggel. A fókuszálási technikától (4.) a szerzők a hatékonyabb felszíni leképezését várják, szemben az általában várt kutatási mélység növekedéssel (Szalai et al. 2007, Szalai et al. 2009c). Az aszimmetrikus elrendezések stratégiája (1e.) az információszerzés területét kísérli meg megnövelni, aminek elsősorban beépített területeken lehet nagy jelentősége. A 2b-e. stratégiák integrálásával a felszín közeli inhomogenitások hatása távolítható el, ami a ténylegesen vizsgálni kívánt tartományok jobb megismerését segítheti elő.

A többi stratégia vagy nem építhető be a 2D multielektrodás rendszerbe, vagy abba automatikusan beépül. Külö-

nösen perspektivikusnak tartjuk komplementer tulajdonságokkal rendelkező elrendezések, így pl. a nagy kutatási mélységgel (ugyanakkor kis vertikális felbontóképességgel) és nagy felbontóképességgel (ugyanakkor kis kutatási mélységgel) rendelkező elrendezések (Szalai et al. 2009c) együttes használatát és inverzióját a multielektrodás rendszerekben.

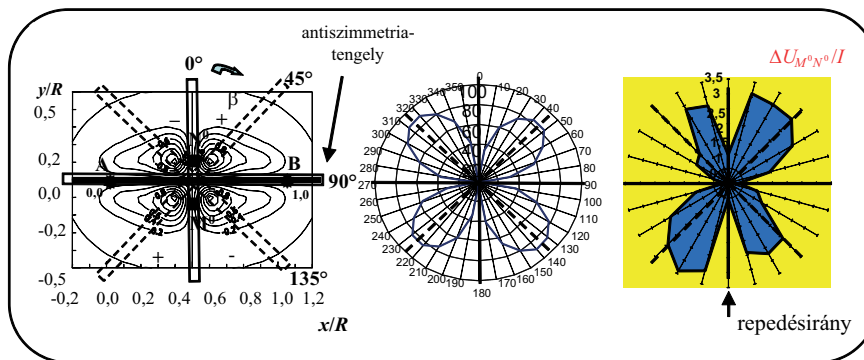
3. A felszíni elektródaelrendezések paraméter-érzékenység-térképei

A fenti elrendezésgyűjtemény megteremtette az alapját az egyes elrendezések különböző paraméterek alapján történő összevetésének. Elsőként az elrendezések paraméterérzékenység-térképeit (PÉT) vizsgáltuk. A PÉT-ek ábrázolásához levezettünk egy analitikus megoldást (Szalai, Szarka 2008b). Ez a megoldás lehetővé teszi bármely felszíni elektródaelrendezés esetére számítani a PÉT-eket, beleértve a nemlineáris és a fókuszált elrendezéseket, illetve azok bármely kombinációját. Bár ez a megoldás alkalmas lenne dipólrelrendezések kezelésére is, ahhoz praktikus okokból a Szalai és Szarka (2000) cikkben megadott, szintén analitikus megoldást használtuk inkább. Példaként a 2. ábrán a sokat tanulmányozott MAN-elrendezés PÉT-jeit mutatjuk be. A fenti analitikus megoldások ráadásul nemcsak a kis-méretű 3D ható által adott választ képesek megadni, hanem a ható az egyes tengelyek irányára merőleges oldalpárjainak



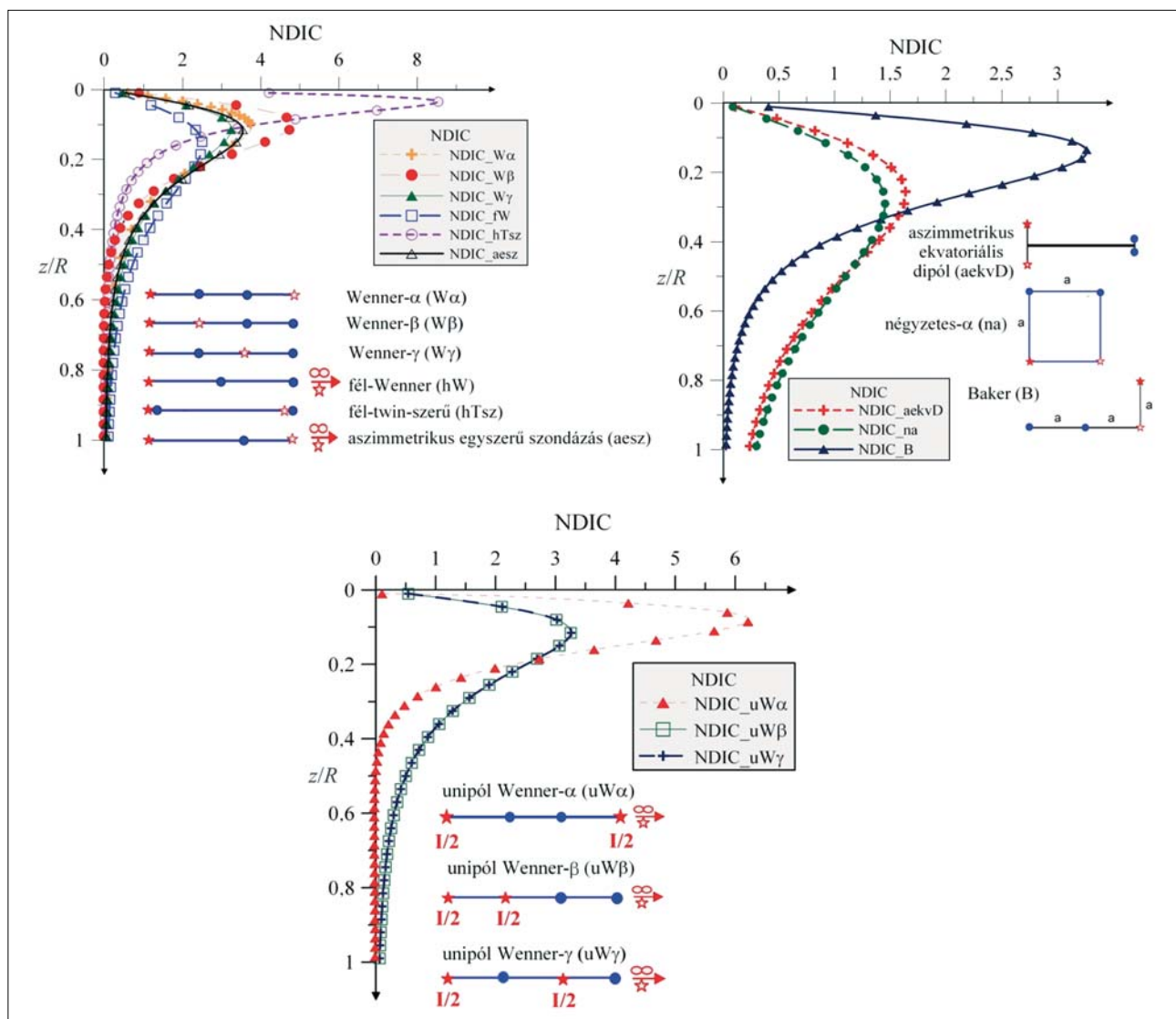
2. ábra | A MAN-elrendezés paraméterérzékenység-térképei. A jelölések mint az 1. ábrán

Figure 2 | Parameter-sensitivity map series of the MAN array. For notations see Fig. 1



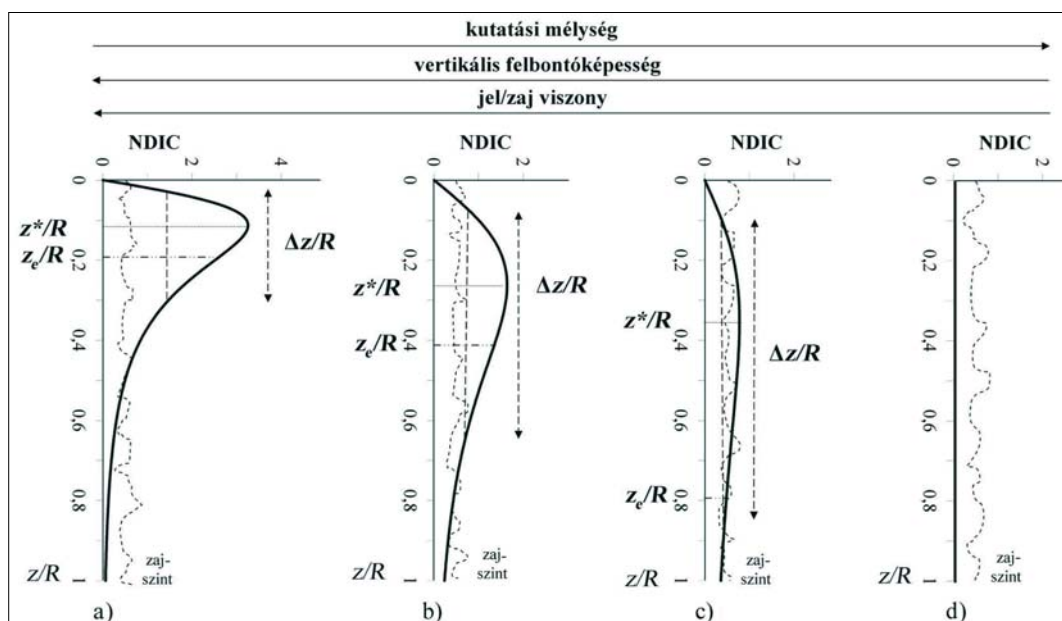
3. ábra a) Annak illusztrálása, hogy hogyan jósolható meg az azimutális mérés eredményeként kapott sugárdiagram alakja szimmetrikus inhomogenitás felett dipól axiális nullelrendezéssel végrehajtott mérés esetén; b) analóg azimutális mérés eredménye; c) terepi mérés eredménye repedés felett

Figure 3 a) Illustration how to predict the shape of the rose diagram constructed from dipole axial null array measurement results obtained above a symmetrical inhomogeneity; b) polar diagram from physical model experiment; c) polar diagram measured in the field above a fissure filled by clay



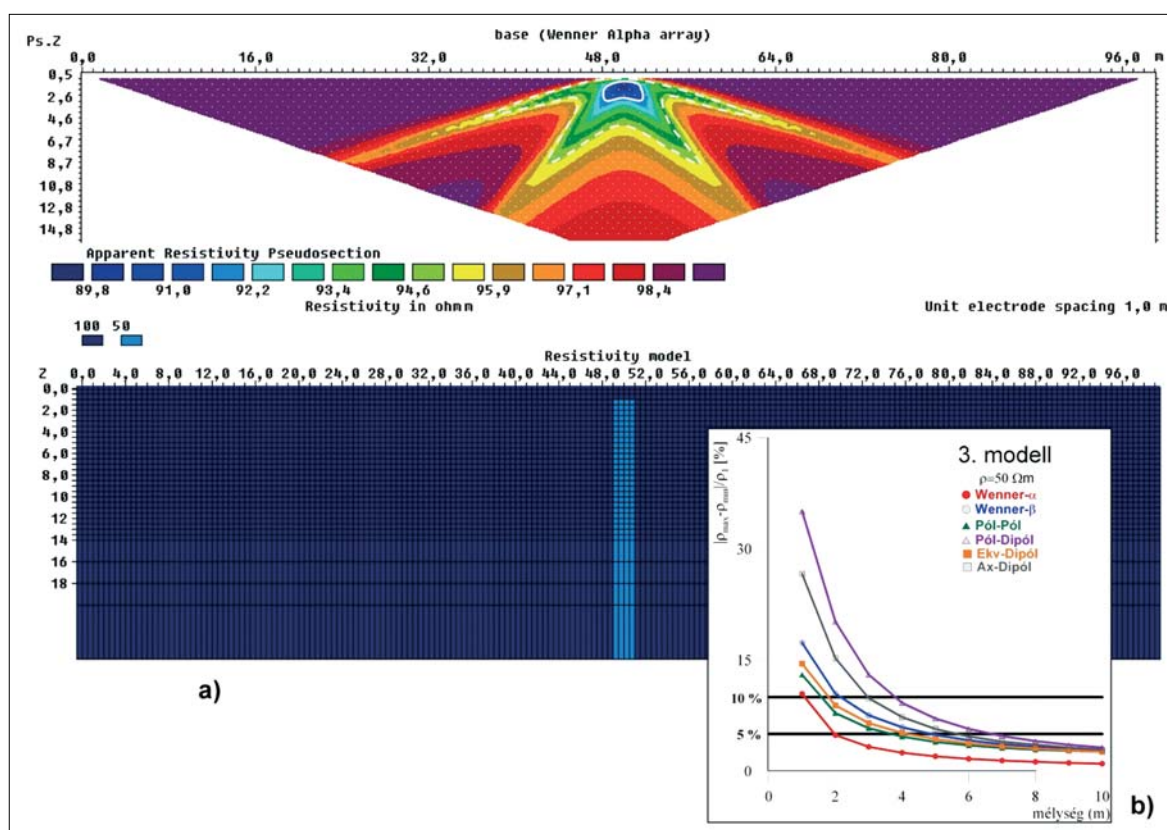
4. ábra Mélységérzékenység karakterisztikafüggvények néhány elrendezésre. Bal fent: vonalelrendezések; jobb fent: nem vonal elrendezések; alul: fókuszált elrendezések

Figure 4 DIC functions of several arrays. top left: linear arrays; top right: non-linear arrays; bottom: focussed dipole arrays



5. ábra Különböző típusú mélységérzékenység karakterisztikafüggvények néhány kiválasztott elrendezés példáján (balról jobbra: Wenner- γ , aszimmetrikus dipól ekvatoriális, pól-pól, MAN-elrendezések), z^*/R és $\Delta z/R$ értékeik, egy feltételezett zajszinttel. A vízszintes nyilak a növekvő értékek irányába mutatnak

Figure 5 Types of the DIC function shown on selected arrays (from left to right: Wenner- γ , asymmetrical dipole equatorial, pole-pole and MAN array), their z^*/R and $\Delta z/R$ values, together with a hypothetical noise level. Horizontal arrows point toward increasing values



6. ábra a) A kimutathatósági mélység értékének megállapítása 5%-os (szaggatott fehér vonal), ill. 10%-os (folytonos fehér vonal) zajszint esetén. b) A kimutathatósági mélység érték megállapításának menete

Figure 6 a) Determination of the DD value in case of 5% noise level (white dotted line), and 10% noise level (white continuous line); b) The process to determine the DD value

2. táblázat Geoelektromos elrendezések Roy és Apparao (1971), illetve Edwards (1977) szerinti kutatási mélység értékei: z^*/R és z_e/R . Az $\alpha 10$, $\beta 45$, $\gamma 45$, $\gamma 40$, $\gamma 10$ nevek előzetes nevek, az elrendezés elektródáinak pozícióira utalnak

	No.	Elrendezés neve	z^*/R	z_e/R	x_A	y_A	x_B	y_B	x_M	y_M	x_N	y_N
nem fókuszált vonalelrendezés	α -típusú	1 Schlumberger ($\alpha 45$)	0,125	0,19	0	0	1	0	0,45	0	0,55	0
		2 Wenner ($\alpha 33$)	0,105	0,175	0	0	1	0	0,333	0	0,666	0
		3 $\alpha 10$	0,035	0,075	0	0	1	0	0,1	0	0,9	0
	β -típusú	4 $\beta 45$	0,035	0,06	0	0	0,45	0	0,55	0	1	0
		5 Wenner- β ($\beta 33$)	0,1	0,14	0	0	0,333	0	0,666	0	1	0
		6 $\beta 10$	0,175	0,225	0	0	0,1	0	0,9	0	1	0
		7 dipól axiális ($\beta 20$)	0,19	0,245	0	0	0,02	0	0,98	0	1	0
		8 aszimmetrikus dipól axiális ($\beta 10$)	0,145	0,19	0	0	0,1	0	0,7	0	1	0
	γ -típusú	9 $\gamma 45$	0,035	0,06	0	0	0,55	0	0,45	0	1	0
		10 $\gamma 40$	0,057	0,06	0	0	0,6	0	0,4	0	1	0
		11 Wenner- γ ($\gamma 33$)	0,115	0,2	0	0	0,666	0	0,333	0	1	0
		12 $\gamma 10$	0,035	0,075	0	0	0,9	0	0,1	0	1	0
	háromelektrodás	13 pól-dipól	0,235	0,365	0	0	100	0	0,9	0	1	0
		14 fél-Wenner	0,16	0,26	0	0	100	0	0,5	0	1	0
		15 fél-twin-szerű	0,035	0,075	0	0	100	0	0,1	0	1	0
		16 aszimmetrikus egyszerű szondázás	0,12	0,185	0	0	1	0	0,6	0	100	0
		17 pól-pól	0,355	0,8	0	0	-100	0	1	0	100	0
nem fókuszált nem vonalelrendezés	dipól-dipól	18 azimutális dipól $0^\circ < \vartheta \leq 90^\circ$	0,25	0,385								
		19 merőleges dipól $0^\circ < \vartheta < 90^\circ$	0,205	0,285								
		20 radiális dipól $0^\circ \leq \vartheta < 90^\circ$	0,195	0,255								
		21 párhuzamos dipól $0^\circ \leq \vartheta \leq 40^\circ$	$\sim 0,19$	$\sim 0,24$								
		22 párhuzamos dipól $40^\circ < \vartheta < 80^\circ$	instabil	instabil								
		23 párhuzamos dipól $80^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$	$\sim 0,255$	$\sim 0,395$								
	nem dipól	24 aszimmetrikus ekvatoriális bipól	0,26	0,4	0	0,1	0	-0,1	1	0,3	1	-0,3
		25 négyzetes- α	0,29	0,45	0	0	1	0	0	1	1	1
		26 Baker	0,14	0,2	0	0	0,5	0	1	0	1	0,5
fókuszált	27 unipól Wenner- α	0,08	0,11	0	0	1^*	0	0,333	0	0,666	0	0
	28 unipól Wenner- β	0,115	0,2	0	0	0,333	0	0,666	0	1^*	0	0
	29 unipól Wenner- γ	0,115	0,2	0	0	0,666	0	0,333	0	1^*	0	0
	30 módosított unipól	0,16	0,415	0	0	1^*	0	0,5	0	100	0	0

hatását is. Ezeket a paramétereket külön-külön is ábrázoltuk 3 különböző mélységben az összes olyan elrendezésre, amelyek esetében a PÉT-ek számítása lehetséges. A térképeket Szalai és Szarka (2008b), valamint Szalai és Szarka (2008c) munkái tartalmazzák.

A PÉT-ek használatát a Schlumberger-féle nullelrendezés példáján keresztül mutatjuk be (Szalai, Szarka, 2006, ill. Szalai, Szarka, 2008b nyomán). Mivel a PÉT-ek komponensektől és mélységtől függetlenül a dipólok középpontjait összekötő egyenszen átmenő vertikális síkra antiszimmetrikusak (3. ábra), az antiszimmetriasík két oldalán attól egyforma távolságra lévő kis hatók éppen annulálják egymást. Ezért ez a nullelrendezés pl. nemcsak homogén feltér, hanem bármely, erre a síkra szimmetrikus ható felett elméletileg nulla jelet ad. Ez a tulajdonság szinte minden terepi alkalmazásra esélyes nullelrendezés esetében fennáll, és reményeink szerint ez a nullelrendezések egyik jól kiaknázható tulajdonsága lesz. Ezt alátámasztják numerikus vizsgálataink is, de azok terepi megerősítéséhez még megfelelő teszterületen végrehajtott mérések szükségesek. Fenti állításokat a MAN-elrendezésre is érvényesek, jöhetnek annak csak egy antiszimmetriatengelye van, és az az elrendezés vonalára merőleges.

4. Kutatási mélység-, és felbontóképesség-számítások

A PÉT-ek számításához adott levezetést felhasználva tudtuk számítani adott mélységben elhelyezkedő vékony rétegek hatását bármely felszíni elektrodelrendezésre (Szalai et al. 2007b, Szalai et al. 2009c). Ily módon számíthatók a kutatási mélység karakterisztikafüggvényei (néhány példa a 4. ábrán látható), amelyek maximumának helye megadja egy adott elrendezés Roy és Apparao-féle kutatási mélységét (Roy, Apparao 1971), a görbe alatti integrál felének megfe-

lelő mélységérték pedig az Edwards-féle mélységértéket (Edwards 1977). Meghatároztuk mindkét mélységértéket az összes lehetséges (30 db) elrendezés esetére (2. táblázat) és kimutattuk, hogy a kétféle mélységérték között gyakorlatilag egyenes arányosság áll fenn, az Edwards-féle kutatási mélység értéke megközelítőleg 1,6-szerese a Roy és Apparao-féle mélységértékeknek.

Kimutattuk, hogy a tapasztalatokkal egyetértésben a kutatási mélység és a vertikális felbontóképesség között közel fordított arányosság áll fenn. A leggyakrabban használt (Wenner- α -, Wenner- β -, Schlumberger-, dipól-axiális és pól-dipól) elrendezések elfogadható kompromisszumot nyújtanak e között a két paraméter között. A kutatási mélység növelhető pl. a pól-pól elrendezés használatával, a vertikális felbontóképesség pedig pl. az $\alpha 10$ vagy a $\gamma 10$ elrendezések használatával. Az áramfókuszálás ugyanakkor a várttal szemben nem vezet a kutatási mélység e definíció szerint számított értékének növekedéséhez.

Felhívtuk a figyelmet arra is, hogy a kutatási mélység értékek a zajjal szorosan összefüggnek (5. ábra). Az információszerzés mélységének elvileg csak a zajok szabnak határt, azok mértékének ismeretében megfelelő elrendezés alkalmazásával a kutatási mélység elméletileg sokszorosára növelhető. Többek között emiatt is kezdtünk szisztematikus zajvizsgálatokba, amelyek első lépéseként azokat a hibákat vizsgáltuk, amelyek a multielektrodás elrendezés elektrodáinak pontatlan pozicionálásából adódnak (lásd a 6. pontot).

5. Kimutathatósági mélységvizsgálatok különböző modellek esetére

Bevezettünk egy olyan, az információszerzés mélységére vonatkozó, a zajokat is figyelembe vevő újfajta kutatási mélységdefiníciót, amely emellett a jelen kihívásainak is

3. táblázat | Különböző modellek kimutathatósági mélysége méterben hat különböző elrendezés esetén különböző zajszinteket feltételezve

modell elrendezés	Véges kiterjedésű (2D) modell								Végtelen kiterjedésű (1D) modell			
	négyzet alapú hasáb				dyke				1D vékony réteg			
	1. modell ($\rho_a = 10 \Omega m$)		2. modell ($\rho_a = 1000 \Omega m$)		3. modell ($\rho_a = 50 \Omega m$)		4. modell ($\rho_a = 200 \Omega m$)		5. modell ($\rho_a = 50 \Omega m$)		6. modell ($\rho_a = 200 \Omega m$)	
zaj-szint	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
P-DP	6,63	4,17	5,67	3,79	5,78	3,12	7,13	4,28	3,78	1,66	3,89	1,80
DP-ax.	7,85	5,01	5,38	3,59	5,62	2,96	6,88	4,03	4,88	2,06	5,09	2,21
W- β	6,89	4,31	4,15	2,61	4,86	2,11	3,25	1,61	4,19	1,89	4,34	2,04
W- α	3,56	2,03	2,77	1,77	1,96	1,05	2,5	1,14	3,59	1,58	3,71	1,72
DP-ekv.	7,88	4,81	2,99	1,89	4,15	1,72	2,15	1,08	3,60	1,58	3,72	1,72
P-P	5,06	3,09	2,86	1,82	3,63	1,48	2,07	0,998	2,46	1,04	2,57	1,19

4. táblázat | A vizsgált elrendezések DD és DIC értékekből kapott helyezéseinek összevetése

	1. modell (2D), 5% zaj		viszony	6. modell (1D), 5% zaj	
	DD (m)	helyezés		DD (m)	helyezés
P–DP	7,07	3	~	3,80	3
DP-ax.	7,81	1~2	~	4,87	1
W- β	6,99	4	>	4,22	2
W- α	3,58	6	>	3,65	4~5
DP-ekv.	7,86	1~2	<	3,65	4~5
P–P	5,00	5	<	2,57	6

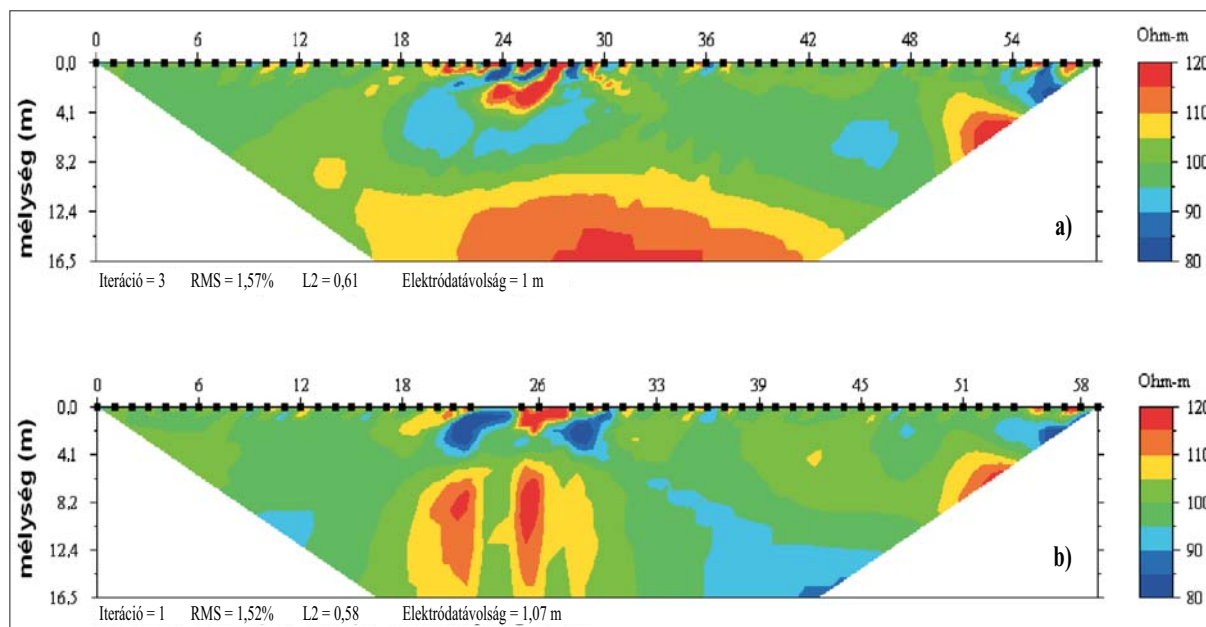
megfelelve már a multielektrodás elrendezések információ-szerzési mélységéről mond valamit (Novák et al. 2006, Szalai et al. 2010a). Ezt kimutathatósági mélységnek nevezzük, és azt a mélységet jelenti, amely mélységből – adott felszíni egyenáramú elrendezés segítségével – a kutatandó objektum egy adott zajszint mellett még kimutatható (lásd 6. ábra). 6 különböző elrendezésre és 6 különböző modellre vizsgáltuk 2 zajszint esetén a kimutathatósági mélységértékeket numerikus modellezést alkalmazva (3. táblázat).

Kimutattuk többek között, hogy a legnagyobb mélységből adott zajszint mellett általában a pól–dipól, a dipól axiális és a Wenner- β -elrendezések képesek detektálni az anómális testeket, legkevésbé hatékonynak általában a pól–pól elrendezés bizonyult, míg a Wenner- α - és dipól ekvatoriális elrendezések általában közepes hatékonyságúak voltak. A zajszint változása az elrendezések sorrendjén nem változtatott, de a meghatározott mélységértékekre természetesen

erős hatással volt. Kimutattuk, hogy bizonyos modellek esetén (pl. négyzet alapú hasábmódel) egyes elrendezések a nagy fajlagos ellenállású (pl. pól–dipól), míg mások (pl. pól–pól) a nagy fajlagos vezetőképességű anomáliákat képesek nagyobb mélységből kimutatni. Más modellek esetében (pl. vékonyréteg-módel) az ellenálláskontraszt előjelének változása nem vezet jelentős különbséghez a kimutathatósági mélység értékek tekintetében.

Kimutattuk azt is, hogy az elrendezések „helyezési sorrendje” erősen modellfüggő (4. táblázat). A dipól ekvatoriális elrendezés, pl. a hasábmódel esetében 1–2., míg a vékonyréteg esetében mindössze a 4–5. helyet foglalja el. Érdekesnek látszik ennek alapján a priori ismereteink birtokában a 3. táblázatnak megfelelően kiválasztani a terepi méréseink során a használandó elrendezést.

Mindenképpen elgondolkodtató és további vizsgálatokra sarkall bennünket a kimutathatósági mélységértékek és a



7. ábra | A pól–dipól elrendezés ellenállás invertált pszeudoszelvénye, mikor is $|\mathbf{r}_{\text{ideál}} - \mathbf{r}_{\text{real}}|$ értékét minimalizáltuk, a) az összes elektróda figyelembevételével, b) négy olyan elektróda (23, 24, 27 és 55) eltávolításával, amelyeknél az x irányú pozicionálási hiba meghaladta a 15 cm-t

Figure 7 | Inverted resistivity pseudosection for the PDP array, where $|\mathbf{r}_{\text{ideál}} - \mathbf{r}_{\text{real}}|$ was minimised. a) Considering all electrodes, b) removing four electrodes (23, 24, 27 and 55), where the positioning error in x direction was larger than 15 cm

kutatási mélységértékek nagyfokú eltérése. A jólvezető hasábmódel pl. a pól–dípól elrendezéssel mutatható ki a legnagyobb mélységből, míg a kutatási mélysége ennek az elrendezésnek a vizsgált 6 elrendezés közül csak az 5. volt (Szalai et al. 2010a).

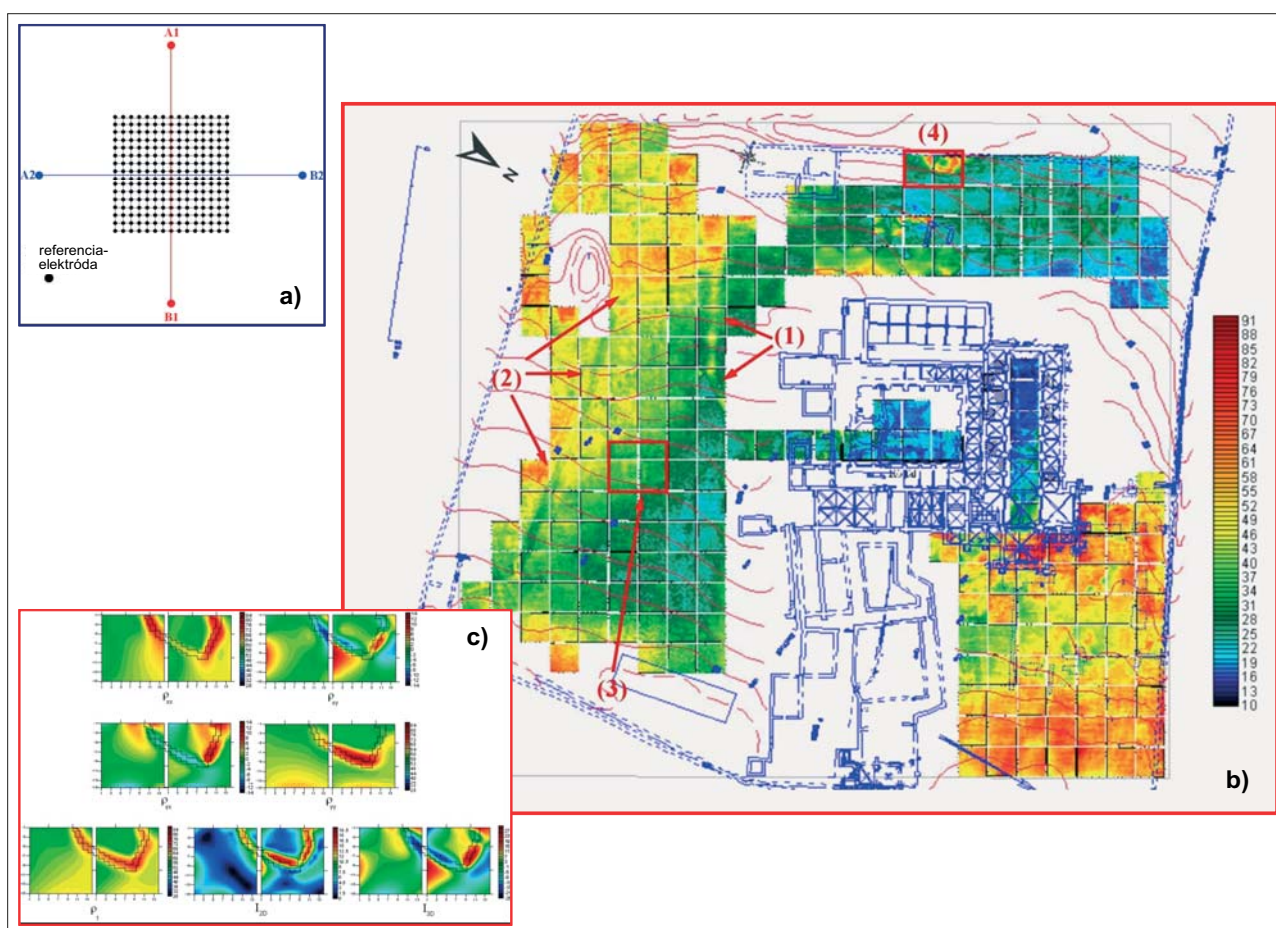
6. Sokelektrodás elrendezések elektródáinak pontatlan pozicionálásából eredő hibák vizsgálata

Egy szisztematikusan szánt zavizsgáló sorozat első elemeként számítottuk az elektródák pontatlan pozicionálásából eredő (azaz geometriai eredetű) hibák hatását különböző sokelektrodás elrendezések esetére (Szalai et al. 2007a, 2008a).

Terepi körülmények között a legnagyobb elővigyázatosság ellenére sem tudjuk az elektródákat tökéletesen a helyükre illeszteni. A legnagyobb hibák okai a sűrű aljnövényzet, a változó topográfia vagy a nagyon köves talaj lehetnek.

Az ezekből eredő hibák pedig megjelennek a mért adatokban, torzítva azokat. Hogy a valóságban mekkorák ezek a pozicionálási hibák, azt lézeres távolságmérő segítségével mértük meg különböző terepi körülmények között. Kiszámítottuk, hogy ezek a pozicionálási hibák mekkora hibához vezetnének a mért fajlagosellenállás-értékekben, ha homogén feltételt hajtánánk végre méréseket.

A 7.a ábra mutatja a pól–dípól invertált szelvényeket köves felszínen mérve, ahol a kövek miatt nem vagyunk képesek az elektródákat megfelelően pozicionálni. Jól látható, hogy ilyen esetben a pozicionálási hibák jelentős, akár 20%-os álnomáliák kialakulásához is vezethetnek még akkor is, ha a legmegfelelőbbnek tűnő megoldást választva, elektródánkat az ideálshoz legközelebbi pozícióba helyezzük el, azaz $|\mathbf{r}_{\text{ideális}} - \mathbf{r}_{\text{valódi}}|$ értékét minimalizáljuk. Mivel ilyen esetben tudjuk, hogy mely elektródák pozíciója nagyon pontatlan, azok hatását eltávolíthatjuk, de az invertált kép még így, adatvesztéssel is álnomáliáktól nagymértékben ter-



8. ábra a) A mérési elrendezés. Az elektródák távolsága 50 cm egymástól; b) a látszólagos fajlagos ellenállástenzor determinánsának térképe a pilisszentkereszti Ciszterci Apátság romjainak képével; c) 3D numerikus modellezés eredményei a kemence modellre. 1–2. sor: Az ellenállás tenzor ρ_{xx} , ρ_{xy} , ρ_{yx} , ρ_{yy} elemeinek térképei. 3. sor: WAL-invariánsok egyenáramú megfelelői (I_{1D} , I_{2D} , I_{3D}). Az x irány a horizontális. Az ellenállásadatok ohmm-ben, I_{2D} és I_{3D} pedig %-ban adottak

Figure 8 a) The layout of the tensorial resistivity mapping. Electrode distance: 50 cm; b) apparent resistivity map (given in ohm-meters), together with the map of the monastery complex. c) Numerical results over the furnace model. Rows 1–2: maps of ρ_{xx} , ρ_{xy} , ρ_{yx} and ρ_{yy} elements of the resistivity tensor. Row 3: the DC versions of the WAL invariants (I_{1D} , I_{2D} and I_{3D}). The x direction is horizontal. The resistivities are given in ohm-meters; I_{2D} and I_{3D} are given in percents

helt lesz (7.b ábra). Jobb megoldás $|\mathbf{x}_{\text{ideális}} - \mathbf{x}_{\text{valódi}}|$ értékének minimalizálása (ahol \mathbf{x} a profil iránya), ráadásul olyannyira, hogy elektródákat a profilra merőlegesen még 4–5-szörösével jobban „félrepozicionálva” is kisebb hibákat kapunk, mint kismértékű profil menti félrepozicionálás esetén.

Megállapítottuk, hogy a pozicionálási hibák normál körülmények között, azaz olyan helyeken, ahol az elektródák pontos elhelyezésének fizikai akadályja nincs, jelentéktelenek. Ahol pedig a pontos elektróda pozicionálásnak fizikai korlátai vannak, ott az elektródákat a profil irányára merőlegesen kell félrepozicionálnunk ahhoz, hogy a lehető legkisebb álnomáliákat kapjunk. Méréseinket tehát fentieknek megfelelően végrehajtva nagymértékben növelhetjük adataink megbízhatóságát még olyan területeken is, ahol a felszín nagymértékben kővel borított.

A fenti vizsgálatokat elvégeztük a Wenner- α -, Wenner- β -, pól-diól és a pól-pól elrendezések esetére is. Ezek tükrében az a gyakran alkalmazott feltételezés, hogy a különböző elrendezésekkel kapott adatállományokat ugyanazzal a random zajjal terheltjük, erős túlegyszerűsítésnek tűnik, hiszen a pozicionálási hibákból eredő zajok erősen elrendezésfüggőnek bizonyultak, ráadásul mivel azok szisztematikus hibát okoznak, az általuk az invertált ábrán létrehozott álnomális meglehetősen nagyméretű lehet.

7. Leképezési eljárás kifejlesztése sokcsatornás potenciáltér-képezés elektródakonfigurációban végrehajtott mérések adataiból

Kidolgoztunk egy módszert, amely alkalmas nagy mennyiségű mérési adat gyorsabb, hatékonyabb háromdimenziós értelmezésére, mint a hagyományos eljárások (Novák et al. 2005a, 2005b, Varga et al. 2008). Jóllehet ez a módszer kissé pontatlanabb, inkább kvalitatív, mint kvantitatív eredményeket szolgáltat az altalaj háromdimenziós fajlagosellenállás-eloszlásáról, ez számos esetben megfelel céljainknak. Erre mutatunk be példát a pilisszentkeresztzi Cisztercita Apátság területén végzett méréseinkből.

A 8.a ábrán látható az alkalmazott elektródaelrendezés. A mérő(potenciál-)elektródák (fekete tele körök) a kutatás szempontjából érdekes területen vannak elhelyezve, attól elegendően nagy távolságra pedig az áramelektrodák két, egymásra merőleges áramdipólus formájában. Az elektróda potenciálját mindkét áramdipólus esetére lemérve megkapjuk a fajlagos ellenállástenzort. A feldolgozás az impedanciatenzor meghatározásán alapul, a tenzorelemek mellett különböző invariánsokat is meghatároztunk.

A 8.b ábra a kolostor körül összesen 239 darab $7 \times 7,5 \text{ m}^2$ -es területen mért invariáns ellenállás- (nevezetesen a ρ_{det}) értéket mutatja a domborzat, a kolostor felülnézeti képe, valamint néhány mesterséges anomália feltüntetésével. Valószínűleg egy felszín alatti csatorna (1), jelenlegi út (2), épületalap-maradvány (3) és kemence (4) maradványait sikerült kimutatnunk.

A (4) anomáliát – amely valószínűleg egy égetőkemence – numerikusan modelleztük, majd a számított adatokat ugyanúgy dolgoztuk fel, mintha mért adatok lettek volna.

A feldolgozás eredményei a 8.c ábrán láthatók a mért potenciál- és áramértékekből meghatározott különböző paraméterek térképeinek formájában. A felső két sorban az impedanciatenzor négy (xx , xy , yx és yy) komponense, az alsó sorban pedig az ún. egy-, két- és háromdimenziós WAL-invariánsok térképe látható. Az ábrából egyértelmű, hogy ebben az esetben az egydimenziós WAL-invariáns (bal alsó ábra) adja a mért adatok legjobb leképezését.

A terepi modellezés során kiderült, hogy az áramelektrodák irányának megváltoztatása megközelítőleg 1,5–2% eltérést okozhat, amely nem befolyásolja az invariáns mennyiségek objektumra vonatkozó átlagos leképezési tulajdonságait. A referenciaelektródák helyzete nincs hatással az invariáns mennyiségek leképezési eredményeire. A mindennapi használatban a hagyományos PM-mérési módszer jól bevált megoldást jelent. A teljes tenzor mérési elvét legalábbis sokkal precízebb elektródaelhelyezés esetén érdemes választani.

A tenzorinvariánsok alkalmas paramétereknek bizonyultak a felszín alatti objektumok felülnézeti geometriájának feltárásához. Két alternatív tenzorinvariáns-csoportot határoztunk meg három-három invariáns megadásával. Az egyik csoportba a matematikai invariánsok tartoznak (determináns, az elemek négyzetösszege és a főelemek középértéke), a másik csoportba a WAL-invariánsoknak megfelelő egyenáramú sorozat (egy ellenállásbecslő paraméter, egy kétdimenziós és egy háromdimenziós indikátor). A numerikus eredmények tanúsága szerint a ρ_{ssq} , ρ_{trace} , ρ_{det} vagy ρ_{I_1} térképek mindegyike megadja a modell tényleges geometriáját. Ezt terepi eredményeink is igazolták. A többdimenziós indikátorok még további információt nyújtanak: I_{2D} a keresett objektum oldalairól (azaz a csapásirányokról), I_{3D} pedig a sarkokról. A terepi adatokra azonban ezek a többdimenziós indikátorok teljesen használhatatlannak bizonyultak (illetve csak markáns anomália létezésében működtek), mivel a jelszint túlságosan alacsony volta miatt a mérési hibák és a különböző zajok elnyomják a valódi fizikai hatást.

8. Aknák detektálási lehetőségeinek vizsgálata 3D egyenáramú mérésekkel

Teszteltük az elektromosellenállás-tomográfia (EET) alkalmazási lehetőségeit aknák kutatására különböző talajviszonyok és eltemetési mélységek esetén (Metwaly et al. 2008). Száraz és nedves talajban lévő, az elektróda távolság 1–2-szeresének megfelelő mélységben elhelyezett fém- és nem fém aknák kimutatási lehetőségeit teszteltük szintetikus axiális és ekvatoriális elektróda elrendezéseket használva (9. ábra). A 3D vizsgálataink tapasztalatai szerint az L1 normával és a legkisebb négyzetek módszerével végrehajtott inverzió meglehetősen jó képet adott az eltemetett aknákról (8. ábra).

Mind a fém-, mind a nem fém aknák kimutathatóak voltak száraz és nedves környezetben egyaránt, de nedves környezetben csak a dipól axiális elrendezés volt képes mindkettőt kimutatni. Száraz talajban ugyanakkor a dipól ekva-

toriális elrendezés adta a legjobb leképezést. A fenti vizsgálatokat különböző zajokkal terhelt adatrendszeren is elvégeztük a korábbiakban jobbnak bizonyult dipól axiális elrendezést használva (9. ábra). Ha a zajszint nem haladta meg az 5%-ot akkor mind a fém-, mind a nem fém aknák kimutathatóak voltak nedves környezetben. Ezzel szemben 10%-os zajszint esetén ezek egyike sem volt már kimutatható. Száraz talajban viszont még ilyen magas zajszint mellett is mindkét típusú akna kimutatható maradt. Kimutattuk azt is, hogy amíg az aknák eltemetési mélysége nem haladta meg az elektródátávolság kétszeresét, addig mindkét aknatípus a talaj nedvességviszonyaitól függetlenül kimutatható volt. Az eltemetési mélység növekedésével azonban a kép rohamosan romlott.

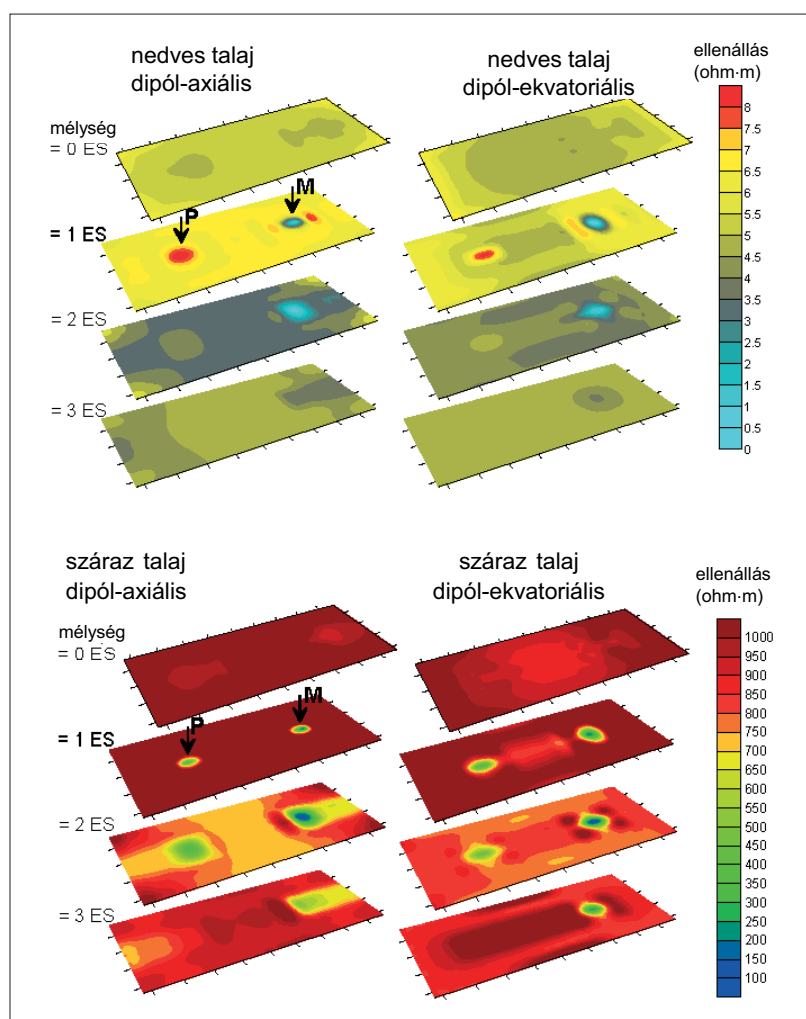
A szintetikus vizsgálatok alapján azt állíthatjuk, hogy:

- 1) Az EET legnagyobb előnye a fémdetektor- és a földradartechnikákkal szemben az, hogy nedves környezetben is jól működik.
- 2) Az EET technika hatékonyan képes együttműködni a hagyományos aknakeresési módszerekkel, legrosszabb esetben legalább, mint az azok eredményeit megerősítő eszközként.
- 3) A módszer vízszintes felbontóképessége az elektródák távolságának és az aknák mélységének függvénye.

9. Többirányú repedésrendszer kutatása

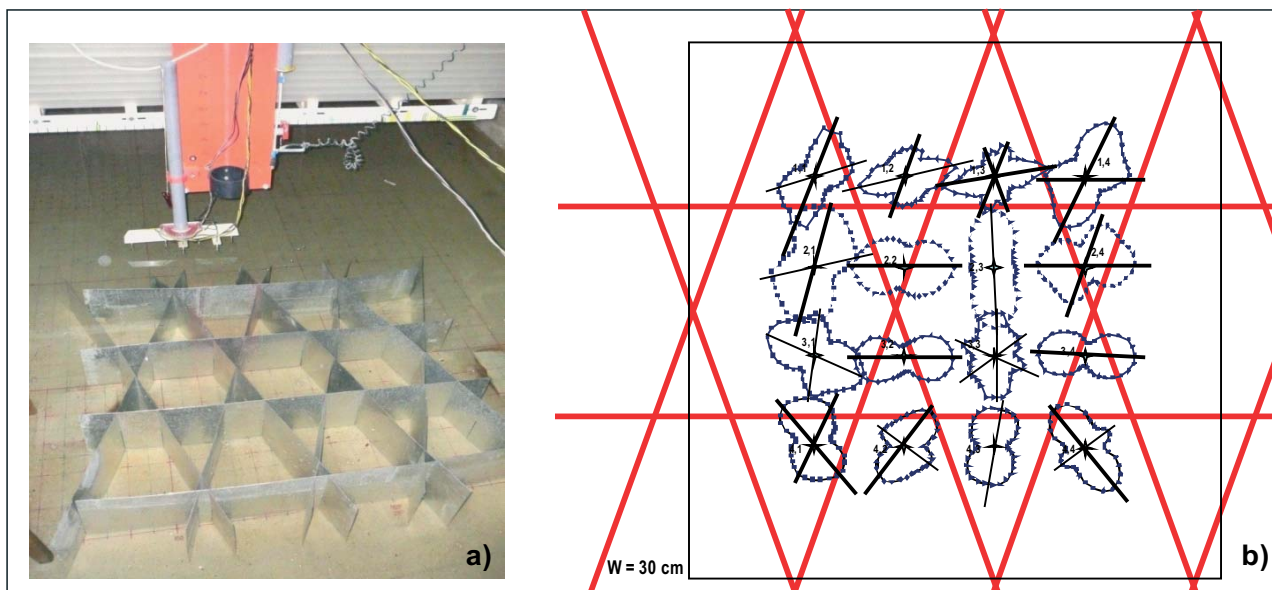
Analóg modellméréseket végeztünk abból a célból, hogy többirányú repedésrendszerek repedési irányainak kidolgozására egy standard módszert fejlesszünk ki (Szalai et al. 2009a, 10.a ábra mutatja a használt modellt). Méréseink megerősítették Sauck és Zabik (1992) tapasztalatait, miszerint a Taylor és Fleming (1988)-féle eljárással kapott sugárdiagram alakja és így az értelmezett repedési irányok is nagymértékben függenek a mérés pozíciójától és a fedőréteg vastagságától. Az elvégzett 48 mérés közül ráadásul egyetlen esetben kaptunk tökéletes megoldást (megkapva mind a 3 létező irányt, míg egyetlen téves irány sem jelent meg, 10.b ábra).

Az analóg modellmérések sikertelenségéből arra következtettünk, hogy a terepi mérések részleges eredménytelenségének oka nem a terepi körülményekben rejlik. Erre utal továbbá az is, hogy a modellmérések során hozzávetőleg akkora találati arányt kaptunk, mint amekkora az az irodalmi adatok szerint a terepi mérések esetén volt (59, 66 és 46% a különböző fedővastagságok esetén, míg közel 2/3 terepen). Jól kontrollálható analóg modellméréseinktől azt vártuk, hogy segítenek a Taylor és Fleming (1988)-féle eljárás



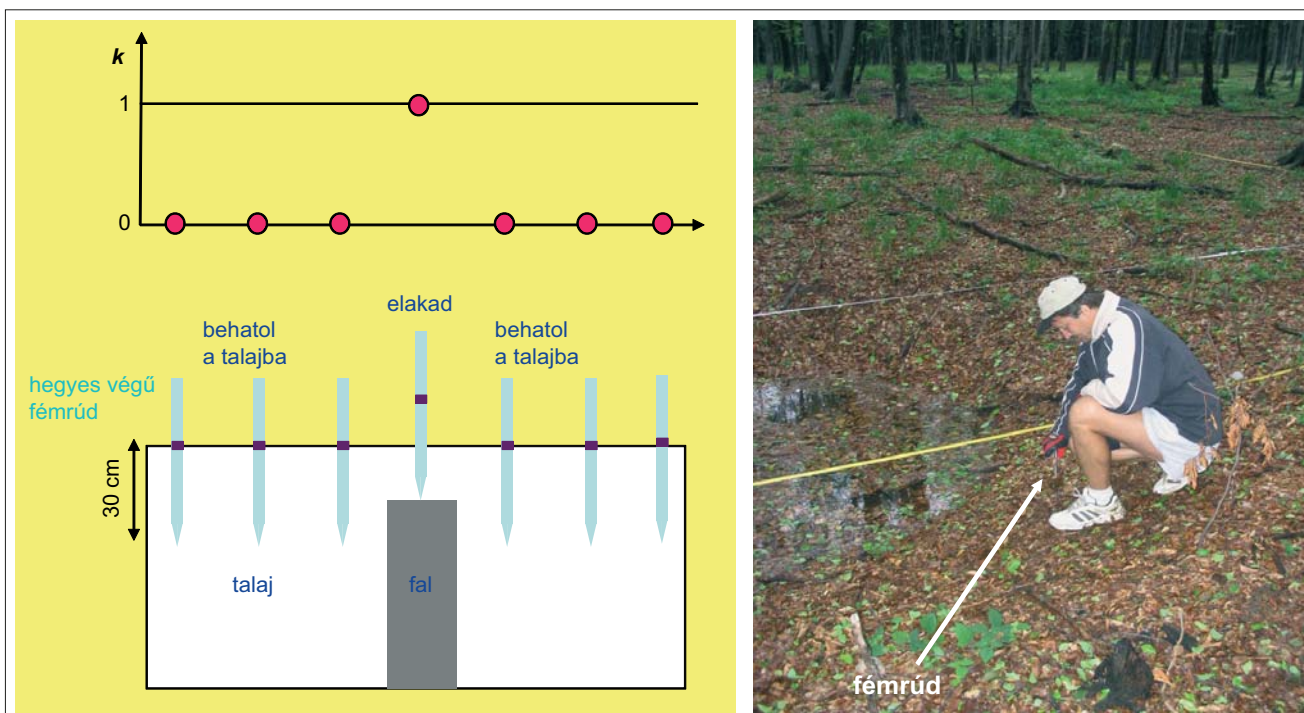
9. ábra Invertált eredmények aknák kimutatására száraz, illetve nedves környezetben axiális, illetve ekvatoriális elrendezésekkel. ES az elektródák távolsága. P és M aknák helyeit jelölik

Figure 9 Inverted models for buried landmines in wet and dry environments using axial and equatorial arrays, respectively. ES is the electrode separation. P and M are the non-metallic and metallic landmines



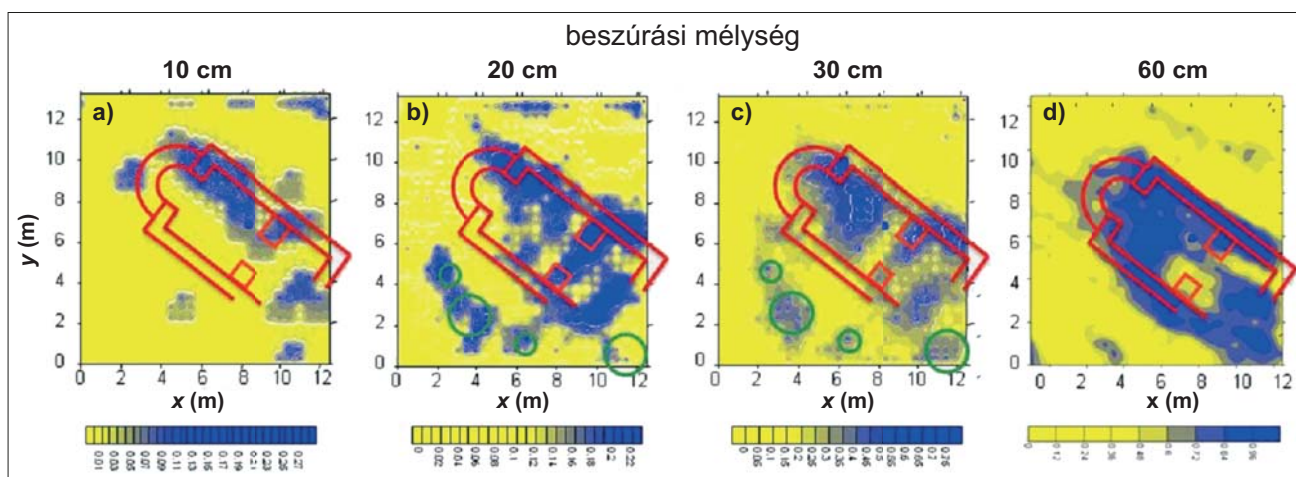
10. ábra a) A mérési elrendezés a modellel. b) Az azimutális mérések eredményei és azok értelmezése az anizotrópia paradoxon feltételezésével. A vastag vonalak a modell alumínium-lemezek (repedések) felszíni vetületeit jelölik, míg a rövid vonalak az értelmezés során kapott irányokat jelölik. Amennyiben ezek vastagok, akkor az értelmezett irány megfelel valamelyik valós iránynak

Figure 10 a) The geoelectric array and the model body; b) Results of azimuthal measurements and their interpretation assuming the existence of the anisotropy paradox. The thick triangular network of lines is the plan view of the fissure models. The short lines are the interpreted fissure directions. In case of short thick lines the interpreted and the real fissure directions are in a good agreement



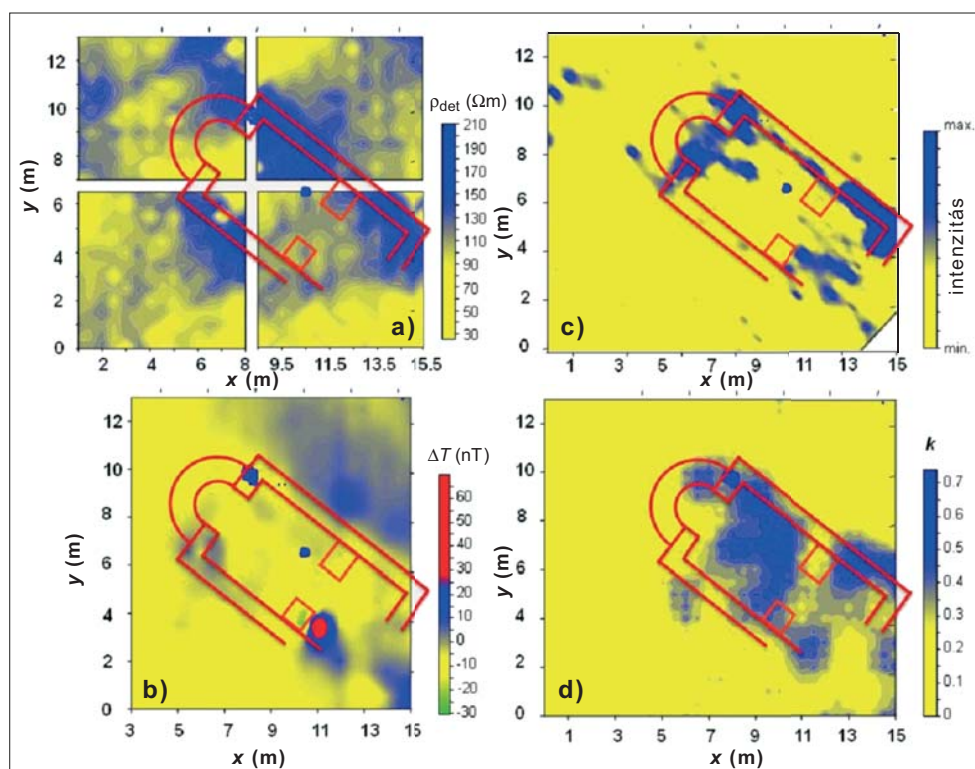
11. ábra A szúrópróbamódszer elve és egy felvétel a terepi alkalmazásáról

Figure 11 Scheme of the Pricking Probe and a photo showing its field application



12. ábra SzP módszerrel kivitelezett szondázás eredményei, sorra 10, 20, 30 és 60 cm beszúrási mélységgel mérve

Figure 12 Sounding with the PP technique with pricking (penetration) depths of 10, 20, 30 and 60 cm



13. ábra 3 geofizikai módszer és a SzP módszer eredményei: a) geoelektromos módszer, b) mágneses módszer, c) földradar, d) SzP

Figure 13 Results of three standard geophysical methods and of the pricking probe: a) geoelectric method, b) magnetic method, c) georadar, d) pricking probe

rásban rejlő problémák feltárásában és a módszer tökéletesítésében.

Vizsgálatainkból a következő következtetéseket vontuk le. Amennyiben adatainkat a Taylor és Fleming (1988) által javasolt módon az anizotrópiaparadoxon létezésének feltételezésével értelmezzük, az üledék vastagságának növekedésével a találati arány egyre romlik, míg az anizotrópiaparadoxon feltevésének elvetésével a találati arány szisztematikusan nő. (A 10.b ábra egy adott fedőréteg-vastagság ese-

tén mért azimutális diagramokat és az azok értelmezésével meghatározott repedésirányokat mutatja a modell felszíni vetületével együtt.) Ezek az eredmények egyértelműen mutatnak arra, hogy a mért eredményekben az anizotrópiaparadoxon esetének bekövetkezése vagy be nem következése döntő fontosságú. Ennek nyomán feltételezzük, hogy nagyon nagy, vagy nagyon kicsi elrendezéshosszú elrendezések használata esetén a megfelelő értelmezési módszert használva az eddigieknél jobb eredményekhez juthatunk.

Alternatív megoldás lehet, hogy adott területen több mérést végzünk és a kapott eredményeket statisztikusan dolgozzuk fel. Ezzel a mérés idő-, és pénzigénye nő ugyan, de megbízhatóbb adatokhoz juthatunk.

Terepi mérésekkel is vizsgáltuk a többirányú repedés-rendszerek feltérképezési lehetőségeit (Szalai et al. 2005b, 2006a). Ezt szelvénymérések és forgatásos mérések kombinált használatával próbáltuk megvalósítani. Ehhez tapasztalataink szerint tekintettel kell lenni a következőkre is:

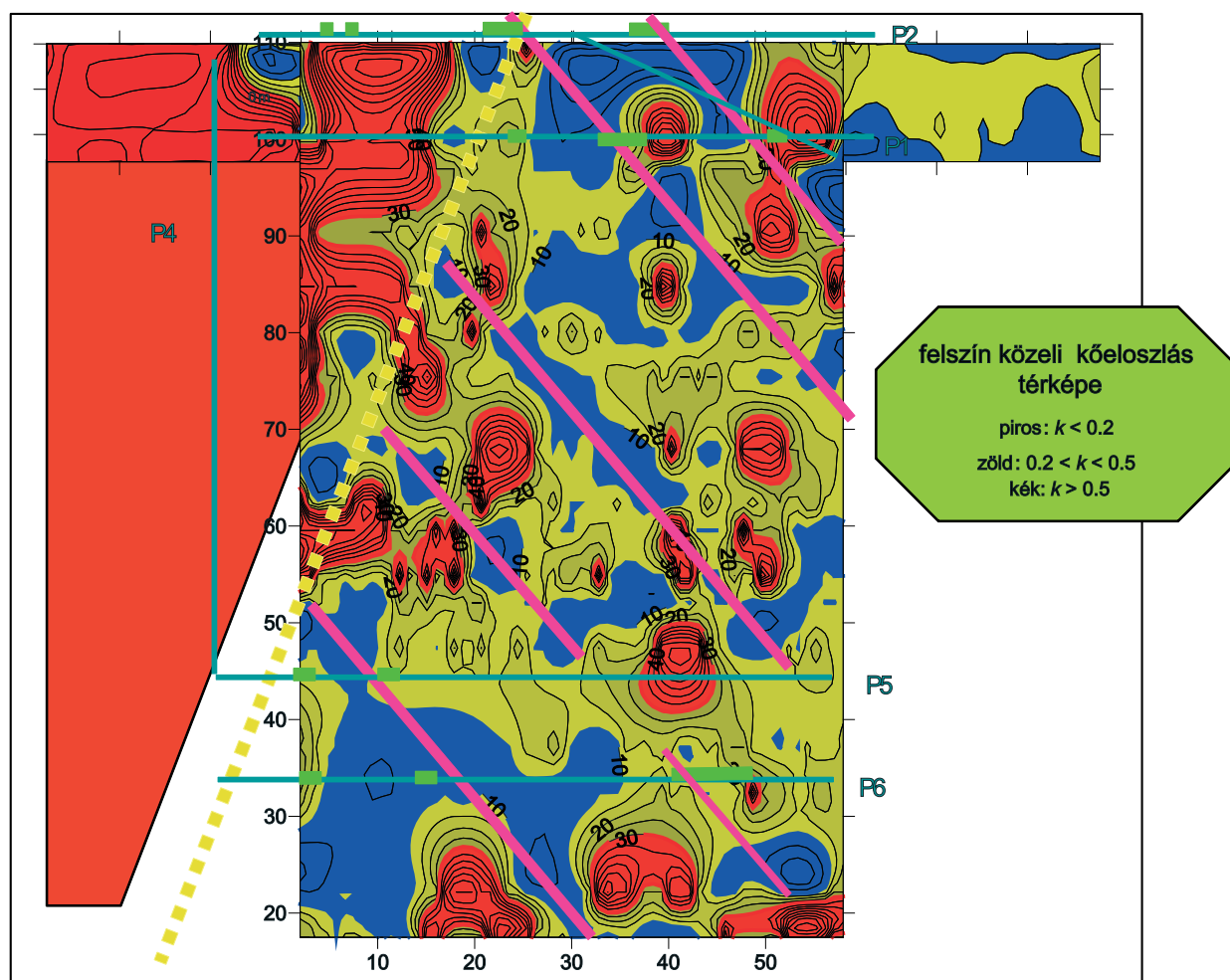
- Először ki kell választani az optimális elektródahosszt, amennyiben ugyanis az elrendezés hossz túl nagy, a repedések nem lesznek elválaszthatók egymástól, amennyiben pedig túl rövidek, a kutatási mélység nem lesz elég nagy.
- Esős időszakot követően, amikor a repedések vízzel teltek, azok hatása a domináns, száraz időszakot követően viszont az aljzat topográfiáját fogjuk méréseinkkel letapogatni.
- Nedves időszakban mind a Wenner-, mind a MAN-elrendezés jó repedésindikátornak bizonyult.

Kulcsparaméter a mérések során a repedések mélységéhez viszonyított távolsága. Ha ez elegendően nagy, még ak-

kor is problémás lehet az egyes párhuzamos szelvényeken kapott anomáliák korrelálása.

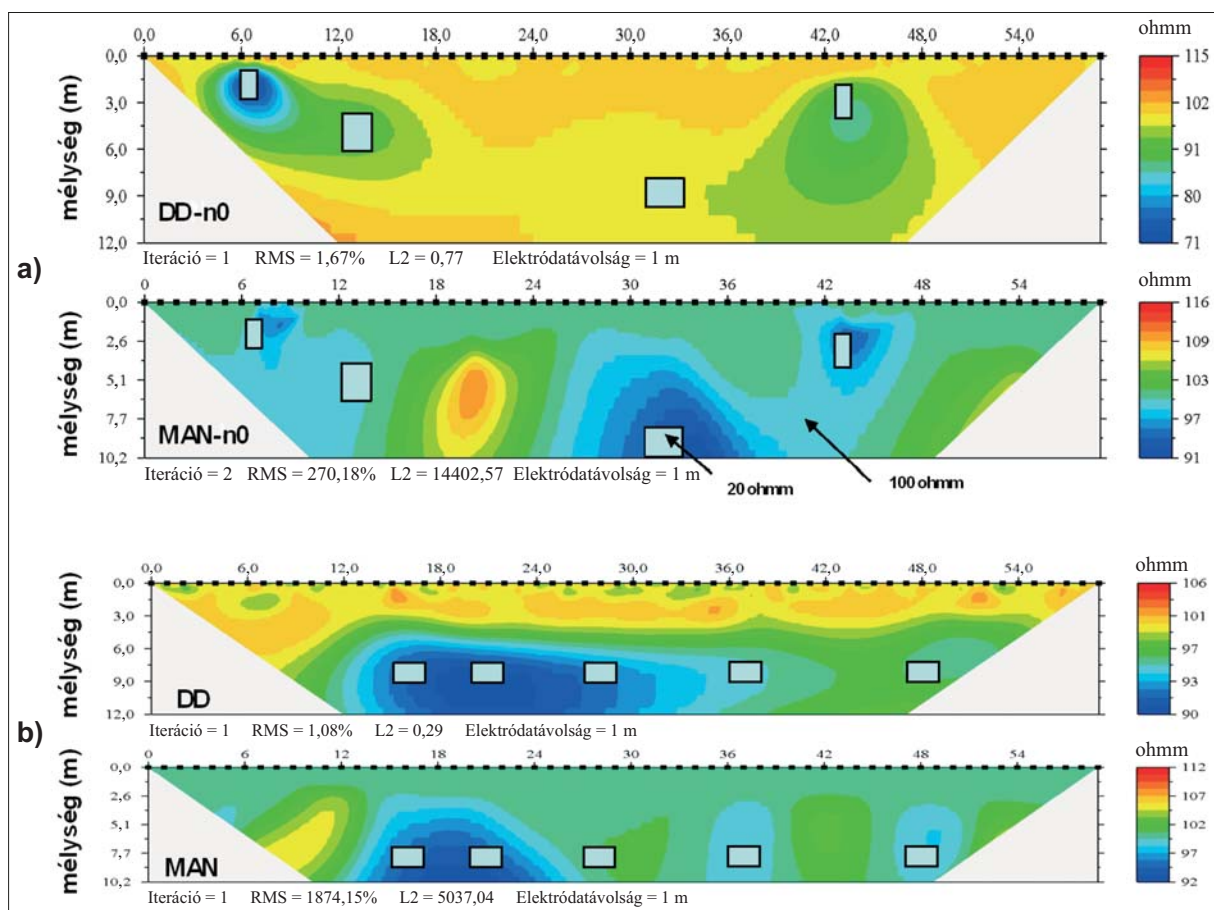
10. A szűrőpróbamódszer és régészeti alkalmazása

A szűrőpróba- (SzP) módszert és annak régészeti alkalmazását Szalai et al. (2009b) és Szalai et al. (2010b) tárgyalta. A módszer alapelvét a 11. ábra illusztrálja. Segítségével először megkerestük a korábban márt feltárt, de mára elfeledett kápolna helyét a sűrű aljnövényzetben, ahol más geofizikai mérések kivitelezése meglehetősen körülményes lett volna. A kápolna részletes megismerésében is nagy segítségünkre volt a SzP módszer. Az általa adottnál a kápolna körvonalait csak a földradar adta meg jobban, ugyanakkor az sem volt képes olyan részletgazdag képet adni, mint a SzP módszer. Meghatároztuk a módszer ideális paramétereit a régészeti mérésekhez. Mintavételezési távolságnak 1 m adódott, mikor célunk valamilyen épület megkeresése volt, és 50 cm, mikor az épület részletes megismerését tűztük ki célul. A beszúrás mélységét az objektumok mélysége szabja meg. Ideális esetben különböző be-



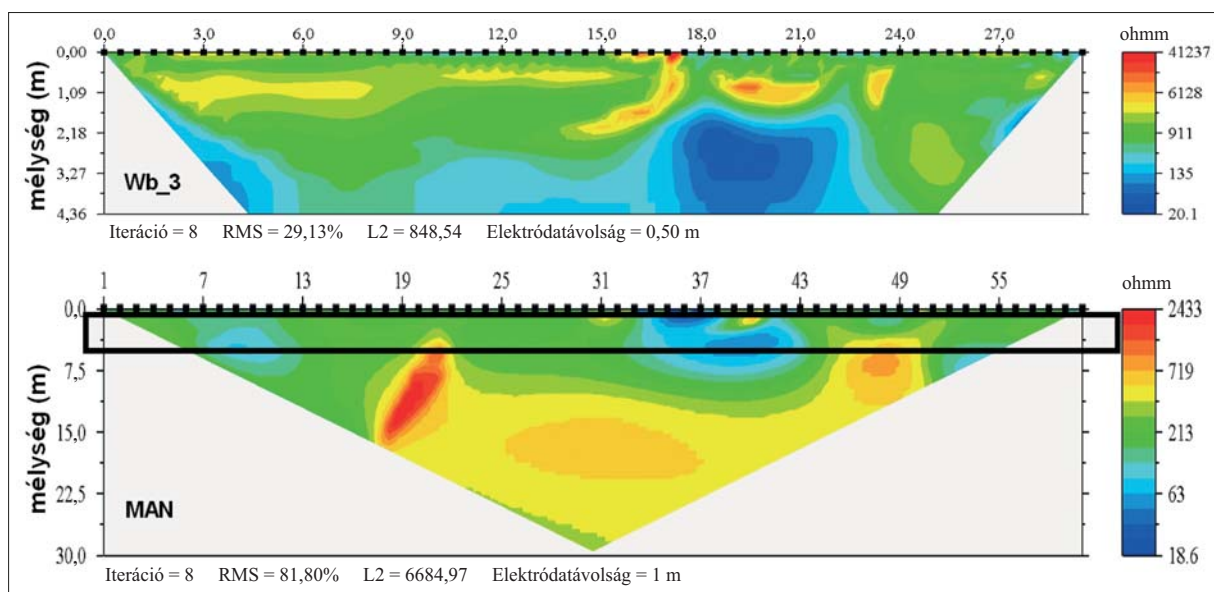
14. ábra A SzP módszerrel kapott eredmények a Homód-árokban (Bakony)

Figure 14 PP results from the Homód-trench (Bakony)



15. ábra | A MAN-elrendezéssel és a dipól axiális elrendezéssel kapott szintetikus eredmények összevetése a) nagy mélységben elhelyezkedő inhomogenitás detektálása során; b) felbontóképesség vizsgálatban

Figure 15 | Comparison of numerical MAN and dipole axial results a) in detection of inhomogeneity in large depth; b) in the investigation of their resolution



16. ábra | MAN- és Wenner-β-mérések eredményei a dunaszekcsői földcsuszamlás területén

Figure 16 | MAN and Wenner-β results in the area of Dunaszekcső landslide

szúrás mélységeket használva akár szondázást is végezhetünk (12. ábra). A beszúrás mélysége gépesítéssel növelhető, de a régészetben úgyszólván elkerülhetetlen a felső meddő rétegek eltávolítása, amelyet követően pedig a 20–30 cm-es beszúrás mélységgel is már nagyon sok információ nyerhető.

A módszernek számos előnye van: terepi kivitelezése egyszerű, viszonylag gyors és olcsó; műszerigénye nincs, ezért nincs beruházási költsége és nincs is műszer, ami elromoljon; a lehető legkedvezőtlenebb terepi körülmények között is alkalmazható, úgymint: rossz időjárási körülmények, szélsőséges topográfia, sűrű aljnövényzet; szondázásra is használható; a többi geofizikai módszerhez kiegészítő információkat nyújt, sőt sok olyan részletet képes megmutatni, amelyet a többi geofizikai módszer nem, vagy nem olyan látványosan (13. ábra). Alkalmazási korlátjai: ha nem szeretnénk megkockáztatni, hogy sérüljenek a régészeti maradványok; ha a régészeti maradványoktól eltérő forrásból is jelentős a felszín közeli réteg kötőanyag-tartalma. Ezek a körülmények a méréseket megakadályozhatják, míg más zavaró körülmények (pl. gyökerek zavaró hatása) elkerülhetők, vagy a mért adatokból kiszűrhetők.

11. Egyéb, angol nyelvű folyóiratban még nem publikált vizsgálataink

Sokelektrodás egyenáramú modellmérésekkel vizsgáltuk, hogy egy homogén feltérben elhelyezett kis átmérőjű, nagy vezetőképességű 2D ható milyen maximális mélységből mutatható ki null- (MAN-), illetve egyes hagyományos elrendezésekkel.

Számítottuk, ábrázoltuk és értelmeztük a Schlumberger-, a dipól axiális, a dipól ekvatoriális, a háromelektrodás és az unipole-elrendezéseknek megfelelő konfigurációjú elrendezések mágneses komponenseire a paraméterérzékenységtérképeket.

Megvizsgáltuk, hogy különböző források és tértartományok esetén mikor használtak már nullelrendezéseket, és mely esetekben nem került sor még ezek használatára. A VLF-EM elrendezés (amely szintén nullelrendezés) egy módosulataival terepi vizsgálatokat végeztünk. A kapott eredmények figyelemre méltóak. Ezzel a módszerrel egyébként elméletileg akkor várhatóak jó eredmények, ha a vizsgálni kívánt ható közel ÉNY–DK vagy ÉK–DNY csapásirányú.

A Homód-árokban (Bakony) végrehajtott terepi méréseink eredményei alapján (Szalai et al. 2006b, Szalai et al. 2008b) úgy véljük, hogy a SzP módszer alkalmas akár nagy mélységben lévő (10–50 m) mészkőfelekű feltérképezésére. A jelenség elméleti alapjai még nem teljesen tisztázottak, és eredményeink is még verifikálásra szorulnak. A Homód-árokban kapott eredményeink (14. ábra) mindenesetre jól korrelálnak mind a helyi fő szerkezeti irányokkal, mind geoelektromos méréseink eredményeivel.

A Balfi-tönkön monitorozást végeztünk a MAN-elrendezéssel, valamint az összehasonlítás érdekében a Wenner- és a Stummer-elrendezésekkel. Méréseink során képet kap-

hatunk arról is, hogy a MAN-elrendezés mennyire képes a felszín alatti közettartományok időbeli változásainak nyomon követésére.

Fentiek mellett rengeteg további hasznos tapasztalatot gyűjtöttünk a multielektrodás MAN-mérésekkel kapcsolatban, amelyek azonban nagyon szerteágazóak, és egyelőre még sok esetben ellentmondásosak. Mind a numerikus- (Szalai et al. 2005a és a 15. ábra), mind a fizikai modellezés, mind pedig a terepi mérések során (16. ábra) voltak olyan modellek (esetek), amikor a MAN-elrendezés jobbnak tűnt a hagyományos elrendezéseknél.

Számos terepi mérést végeztünk a korábban említett módszerek kombinált használatával többek között vetők vizsgálatára Illmitz térségében (Ausztria, Fertő-part), földcsuszamlással kapcsolatos vizsgálatokra (Dunaszekcső), illetve karszt kutatásra (Balfi-tönk).

A K49604. számú OTKA keretében összesen 68 publikációt, illetve kutatási jelentésünk készült. Ezek közül 10 angol nyelvű, SCI-s folyóiratban megjelent cikk, melyek összesített impliktfaktora 3,725. 10 angol nyelvű kibővített absztraktot, 6 angol nyelvű rövid absztraktot, 3 magyar nyelvű cikket és 3 kutatási jelentést készítettünk. Eredményeinket mind külföldön, mind Magyarországon 18 előadásban ismertettük.

Konklúziók

A K49604. sz. „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c. OTKA-projekt célja a gyakorlati mérések során nem, vagy ritkán használt elrendezések egy részének vizsgálata volt, különös tekintettel az ún. nullelrendezésekre. Ennek a célnak a megvalósításához elsőként összeszedtük az összes felszíni geoelektromos elrendezést, hogy a vizsgálni kívánt elrendezéseink helyét lássuk és hogy azokat más elrendezésekkel összevehetjük. Megvizsgáltuk az egyes elrendezések kialakításának hátterében található motivációt. Elkészítettük az összes elrendezés paraméterérzékenységtérképeit és példákkal illusztráltuk ezek használhatóságát. Kiszámítottuk 30 elrendezés Roy és Apparao- és Edwards-féle kutatási mélységértékét, vertikális felbontóképességüket, a kutatási mélységértékeik és felbontóképesség-értékeik viszonyát egymáshoz, valamint a kutatási mélység és a zaj viszonyát. Megállapítottuk 6 elrendezés egyes modellekre vonatkozó ún. kimutathatósági mélységértékeit különböző zajszintek feltételezésével.

A fenti elméleti vizsgálatok segítségével terepi méréseket végeztünk. Lemértük az elektrodák különböző terepi körülmények között várható pozicionálási hibáit, és kiszámítottuk az ebből eredő hibák hatását különböző sokelektrodás elrendezések esetére. Tenzoriális geoelektromos régészeti méréseket végeztünk, majd teszteltük a 3D elektromos tomográfia lehetőségeit aknáknak kimutatására különböző talajviszonyok között és különböző mélységekben. Kidolgoztunk egy eljárást többirányú repedésrendszerek kutatására. Kifejlesztettük az ún. szűrőpróba-eljárást és bizonyítottuk annak használhatóságát régészeti kutatásokban.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők rendkívül hálásak a K49604. sz. OTKA-pályázat támogatásának, amely nélkül a fenti eredmények nem jöhettek volna létre. A fenti kutatómunka hosszú éveitől további OTKA-projektetől is kaptunk résztámogatást (T049604, T037694, TS408048 és NI61013ILO). Köszönet illeti a Bolyai János Kutatási Ösztöndíjat is, amellyel Szalai Sándor kutatómunkáját támogatták. Szakmai támogatást kaptunk sok hazai kollégánktól – akik közül Ádám Antalt, Verő Józsefet (MTA GGKI, Sopron), Takács Ernőt, Gyulai Ákost, Pethő Gábort (Miskolci Egyetem) és Kis Jánost (ELGI) emeljük ki –, valamint számos külföldi kollégától.

Hivatkozások

- Edwards L. S., 1977: A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics* 42, 1020–1036
- Metwally M., El-Qady G., Matsushima J., Szalai S., Al-Arifi N. S. N., Taha A., 2008: Contribution of 3-D electrical resistivity tomography for landmines detection. *Nonlin. Processes Geophys.* 15, 977–986
- Novák A., Szalai S., Szarka L., 2006: Target detectability depths of DC arrays for various models. *Extended Abstracts of the Near Surface 2006*, Helsinki, Sept. 4–6, EAGE
- Novák A., Szarka L., Varga M., Szalai S., Pap Zs., Károlyi A., 2005a: Tensor invariant based electrical potential mapping, and its use in an archaeological field study. *IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth*, Proceedings of the 17th Workshop, <http://www.emindia2004.org>
- Novák A., Varga M., Szalai S., Szarka L., 2005b: Tensorial apparent resistivity mapping and archaeological case study. *Paper G 018*, EAGE Meeting, Madrid, 13–18 June
- Roy A., Apparao A., 1971: Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics* 36, 943–959
- Sauck W. A., Zabik S.M., 1992: Azimuthal resistivity techniques and the directional variations of hydraulic conductivity in glacial sediments. *SAGEEP'92*, 1, 197–222
- Szalai S., Koppán A., Szarka L., 2007a: Effect of Positional Inaccuracies on Multielectrode Results, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul P28
- Szalai S., Koppán A., Szarka L., 2008a: Effect of positional inaccuracies on multielectrode results. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.* 43/1, 33–42
- Szalai S., Kósa I., Nagy T., Szarka L., 2009a: Effectivity Enhancement of Azimuthal Geoelectric Measurements, Near Surface 2009 – Proceedings of the 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, P25
- Szalai S., Lempert I., Pattantyús Á. M., Szarka L., 2009b: Pricking Probe as a Complementary Technique in Archeological Prospecting, Near Surface 2009 – Proceedings of the 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, A03
- Szalai S., Lempert I., Pattantyús Á. M., Szarka L., 2010b: The pricking probe method in archeological prospecting. *Journal of Archaeological Science* 38, 175–182, DOI: 10.1016/j.jas.2010.09.002
- Szalai S., Novák A., Szarka L., 2007b: Depth of Investigation of Dipole-dipole, Noncolinear and Focused Geoelectric Arrays, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul P26
- Szalai S., Novák A., Szarka L., 2009c: Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 14/1, 15–23.
- Szalai S., Novák A., Szarka L., 2010a: Which geoelectric array sees the deepest in noisy environment? Depth of detectability values of multielectrode systems over various two-dimensional models, *Physics and Chemistry of the Earth*, közlésre elfogadva, DOI: 10.1016/j.pce.2011.01.008
- Szalai S., Szarka L., 2000: An approximate analytical approach for computing geoelectric response due to a small buried cube. *Geophysical Prospecting* 48, 871–885
- Szalai S., Szarka L., 2006: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays, *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics (ICEEG)*, Wuhan, China, June 4–9, 2006, Science Press, Inc., USA (Wang J., Xu Y., Xia J., Chen., eds.) *Geophysical Solutions for Environment and Engineering* 1, 260–264
- Szalai S., Szarka L., 2007a: Classification of Surface Geoelectric Arrays, London 2007, 69th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2007
- Szalai S., Szarka L., 2007b: Auxiliary Results of Collection and Classification of Surface Geoelectric Arrays, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul A09
- Szalai S., Szarka L., Marquis G., Sailhac P., Kaikkonen P., Lahti I., 2005a: Colinear null arrays in geoelectrics. *IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth*, Proceedings of the 17th Workshop, <http://www.emindia2004.org>
- Szalai S., Szarka L., Prácsér E., Bosch F., Müller I., Turberg P., 2002: Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null arrays. *Geophysics* 67, 1769–1778
- Szalai S., Szarka L., Révi G., Varga M., 2005b: Geoelectric investigation of a multidirectional fissure system in a karstic area. *P047 Near Surface 2005*, Palermo
- Szalai S., Szarka L., Révi G., Varga M., 2006a: Geoelectric investigation of a pluridirectional fissure system in a karstic area, *Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental and Engineering Geophysics (ICEEG)*, Wuhan, China, June 4–9, 2006, Science Press, Inc., (Wang J., Xu Y., Xia J., Chen., eds.) *Geophysical Solutions for Environment and Engineering*, 1, 287–291
- Szalai S., Veress M., Novák A., Szarka L., 2006b: Geofizikai vizsgálatok fedett karszton (Homód-árok, Bakony), In: Veress Márton (szerk.) *Karsztféjlődés XI*, Szombathely: Berzsenyi Dániel Tanárképző Főiskola, 153–170
- Szalai S., Szarka L., 2008a: On the classification of surface geoelectric arrays, *Geophysical Prospecting* 56, 159–175
- Szalai S., Szarka L., 2008b: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays I. Linear arrays. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.* 43/4, 419–437, DOI: 10.1556/AGeod.43.2008.4.4
- Szalai S., Szarka L., 2008c: Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays II. Nonlinear and focussed arrays. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.* 43/4, 439–447, DOI: 10.1556/AGeod.43.2008.4.5
- Szalai S., Veress M., Novák A., Szarka L., 2008b: Application of the simplest geophysical method, the pricking probe method to map bedrock topography in a buried karstic area, *EAEG-Near-surface*, P17, 2008, Kraków, Poland
- Taylor R. W., Fleming A. H., 1988: Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water* 26 464–474
- Varga M., Novák A., Szarka L., 2008: Tensorial electrical resistivity mapping and an archeological field application. *Near Surf. Geophys.* 2008/1, 39–47

Elektromágneses módszerfejlesztések a mérési adatokban lévő földtani információ hatékonyabb és stabilabb feltárása céljából (T046765. sz. OTKA-projekt)

TURAI ENDRE¹, DOBRÓKA MIHÁLY^{1,2}, TAKÁCS ERNŐ¹, SZABÓ ISTVÁN³,
SZABÓ NORBERT PÉTER¹, VASS PÉTER¹, HERCZEG ÁDÁM¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²MTA–ME, Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, 3515 Miskolc-Egyetemváros

³MOL NyRt. Kutatás-Termelés, Petrofizika, 5001 Szolnok Ady E. u. 26.

Az OTKA-téma keretében 3D elektromágneses (EM) globális inverziós szoftvereket fejlesztettünk ki. A szoftverekkel felszín közeli olajszennyezések inverziós rekonstrukcióját végeztük el.

Az EM módszerek esetére GIS alapú fejlesztést végeztünk, s GeoMedia Open GIS alatt működő rendszert hoztunk létre, amely lehetővé teszi az EM és IP paraméterek komplex képi és numerikus elemzését.

Sikeresen pályáztunk az Intergraph RRL programjára. GeoMedia WebMap alatt kifejlesztettük a GIS alapú rendszer hálózati kliens verzióját.

Vizsgáltuk a felszín közeli vetős szerkezetek és a csővezetékek hatását a H_z és az E_x/H_y térkomponensek amplitúdó- és fázisviszonyaira. A béléscsőves gerjesztésű geoelektromos szondázások adatainak inverziójára elkészült a „Cube3Dinv” elnevezésű program, melyben a direktfeladat megoldása integrálegyenletes módszerrel történik.

Az IP módszer esetén elvégeztük az időállandó-spektrum inverziós számításának továbbfejlesztését. Megoldottuk az időállandó-spektrum Fourier-spektrumok segítségével történő meghatározását.

A korábbi terepi mérések adatainak újrafeldolgozása mellett négy szennyezett területen új terepi méréseket is végeztünk. Az eredmények igazolták, hogy a szennyezettség mértékének a becslésére alkalmas az időállandóval súlyozott amplitúdóérték (WAV). Az időállandó-spektrumok alapján a szennyezés szempontjából veszélyesebb redox és fémek hatásai által érintett térrészek lehatárolhatók.

A szennyezés lehatárolására bevezettük a korrigált elektromos vezetőképességet.

Turai, E., Dobróka, M., Takács, E., Szabó, I., Szabó N. P., Vass, P., Herczeg, Á.: Development of Electromagnetic (EM) Methods tending to more efficient and more stable revelation of the geological information from field data (OTKA 046765)

In the framework of the research 3D electromagnetic (EM) global inversion software has been developed. We performed the inverse reconstruction of near-surface oil contaminations using this software.

A GIS based system under GeoMedia Open GIS has been developed for EM Methods, which makes possible the complex image and numerical analysis of EM and IP parameters.

Our application for the Intergraph RRL program membership was successful. We developed the network client version of the GIS based system.

The effects of the pipes and near surface structures with faults for the amplitude and phase relation of H_z and E_x/H_y parameters were examined. A software named “Cube3Dinv” for the inversion of geoelectric sounding data obtained by using well casing for transmission has been finished. The software uses integral equation method for the solution of the forward problem.

We elaborated the calculation of the IP time constant spectra using inverse methods. Determination possibility of time constant spectrum from Fourier spectra has been solved.

We performed four new field measurements over contaminated areas beside the data reprocessing of former field measurements. Results verified that the amplitude value waited with time constant (WAV) is suitable for the estimation of the contamination level. The dangerous contamination types, the areas touched by redox and metallic effects can be determined on the basis of time constant spectra.

Corrected electric conductivity has been introduced for the mapping of contamination.

Beérkezett: 2010. december 17.; *elfogadva:* 2011. március 3.

A többdimenziós integrálegyenletes numerikus modellezési módszerek fejlesztése területén elért fontosabb eredmények (1. résztema)

A 3D hibrid integrálegyenletes elektromágneses modellezés stabilitásának növelését célzó fejlesztéseket végeztünk, amely lehetővé tette a globális inverziós rendszerek előre-modellezési részében való alkalmazást. Az elemzések alapján az SA (*Simulated Annealing*) és a VFSA (*Very Fast Simulated Annealing*) inverziós módszer számítógépes algoritmusokban való alkalmazása mellett döntöttünk.

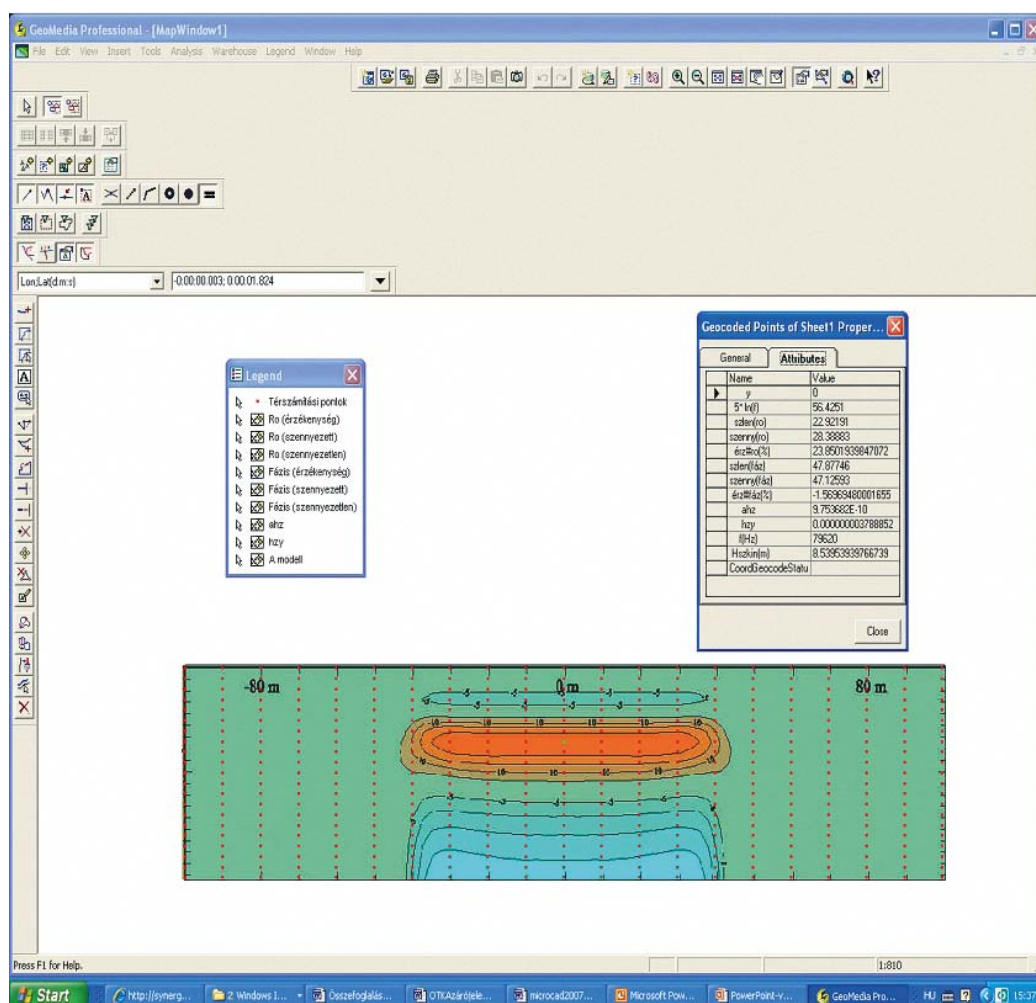
A továbbfejlesztett algoritmusok alapján 3D elektromágneses globális inverziós szoftvereket fejlesztettünk ki. A kifejlesztett inverziós szoftverekkel felszín közeli 3D olaj-

szennyezések inverziós rekonstrukciójának az elemzését végeztük el az olajszennyezések felett számított fajlagos-ellenállás- és a fázisadatok alapján. A 3D inverzió egyik eredményét foglalja össze az 1. táblázat, amely alapján megállapítható, hogy az inverzió hatékonyan működött, hiszen 230%-os startmodell-távolságról indítva, 3,16%-os eltéréssel becsülte meg a paraméterek értékeit.

A síkhullámú elektromágneses módszerek esetére térinformatikai (GIS) alapú rendszerfejlesztést végeztünk. Adatbázist állítottuk össze, amely a GeoMedia nyitott tér-

1. táblázat | Olajszennyezés 3D elektromágneses inverziójának eredménye

Modellparaméterek	$\rho_{\text{fedő}}$ (ohmm)	ρ_{olaj} (ohmm)	$\rho_{\text{fekü}}$ (ohmm)	H_{olaj} (m)	$H_{\text{fedő}}$ (m)	Adattávolság
Célmodell	20	500	5	3	7	–
Kezdőmodell	100	200	10	3,50	6,5	230 %
Inverzióval becsült	20,8	416,7	5,55	2,97	7,03	3,16 %



1.1. ábra | A fajlagosellenállás-értékek olajszennyezésre való érzékenységének vertikális eloszlásképe és a GIS adatbázisban végzett egyik keresés eredménye

Figure 1.1 | Vertical section of sensitivity distribution of the resistivity value for oil contamination and a query result from GIS database

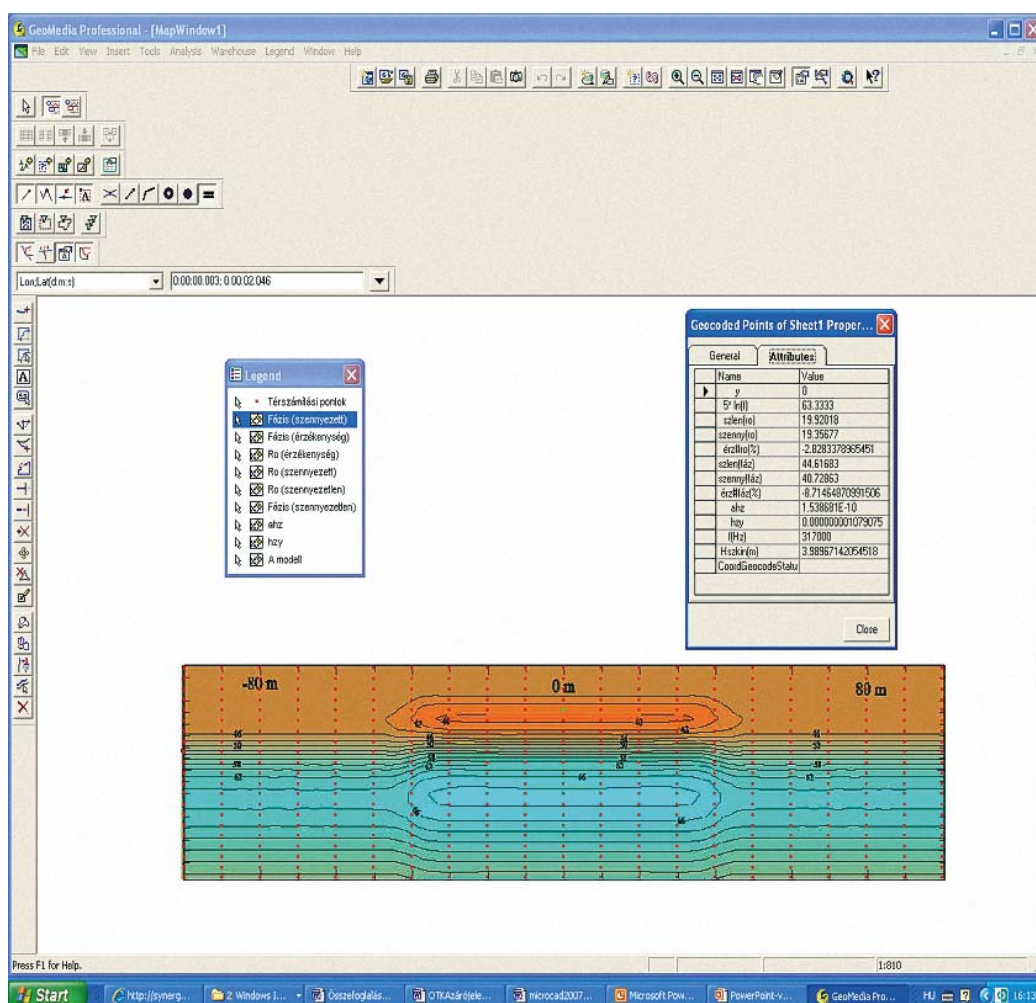
informatikai szoftver alá grafikus-alfanumerikus kapcsolatrendszerrel csatlakoztatható, s a modellezéssel kiszámítható elektromágneses paramétereket a térinformatikai rendszer tematikus dimenzióiként definiálva, lehetővé válik az EM paraméterek komplex képi és numerikus elemzése. A térinformatikai adatbázis alapján a GeoMedia Open GIS alatt működő geoinformatikai rendszert hoztunk létre.

A GIS adatbázis minden térszámítási pontban az EM primer (elektromos és mágneses térerősség-komponensek valós, képzetes, amplitúdó- és fázisértékei) és szekunder (frekvenciafüggő fajlagos ellenállás, impedanciák, impedanciafázis, H_z/H_y értékek, szkinmélység, érzékenységek) paraméterek numerikus értékeit tartalmazza, melyet saját fejlesztésű 3D hibrid integrálegyenletes eljárással számítottunk ki felszín közeli olajszennyezést tartalmazó modellek és kommunális hulladéklerakó modellek esetére. Az alábbi ábrákon egy adott olajszennyezést tartalmazó modellre összeállított GIS estében mutatunk be három szemléltető példát.

Az 1.1. ábrán a „Legend” ablak a kifejlesztett GIS tematikus dimenzióit mutatja, a munkablakban alul, középen a

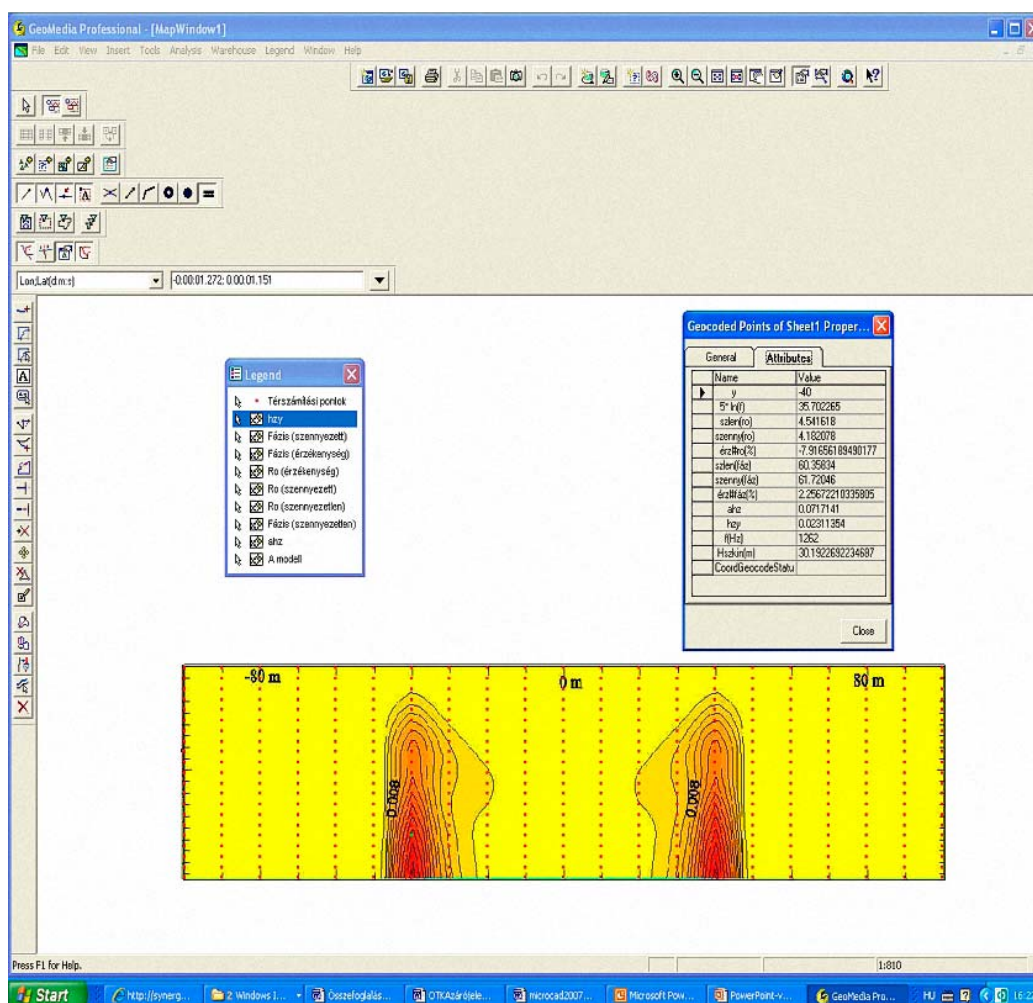
fajlagosellenállás-értékek olajszennyezésre való érzékenységének vertikális eloszlásképe látható a modell y tengellyel párhuzamos szimmetriasíkjában, míg a „Geocoded Points of Sheet1 Proper ...” megnevezésű ablak az adatbázisban végzett egyik keresés eredményét szemlélteti. Az 1.2. ábra ugyanebben a szimmetriasíkjban mutatja be az impedanciafázis-értékek vertikális eloszlásképet és az adatbázisban végzett egyik keresés eredményét („Geocoded Points of Sheet1 Proper ...” ablak). A horizontális mágneses térerősség-komponensre (H_y) normált vertikális mágneses térerősség-komponens (H_z) modellbeli alakulásából az y tengellyel párhuzamos szimmetriasíkjban (1.3. ábra) megállapítható, hogy a H_z/H_y paraméter maximális értékei nagy biztonsággal kijelölik az olajszennyeződés laterális határait.

Az OTKA projekthez kapcsolódva sikeresen pályáztunk az Intergraph RRL (*Registered Research Laboratory*) programjában való részvételre, és 2006 januárjától két évig az Intergraph által támogatott kutatóhely lettünk. A támogatási időtartamon belül GeoMedia WebMap alatt kifejlesztettük a GIS alapú rendszer hálózati kliens verzióját.



1.2. ábra Az impedanciafázis-értékek vertikális eloszlásképe és a GIS adatbázisban végzett egyik keresés eredménye

Figure 1.2 Vertical distribution section of the impedance phase value and a query result from GIS database



1.3. ábra A H_z/H_y paraméter vertikális eloszlásképe és a GIS adatbázisban végzett egyik keresés eredménye

Figure 1.3 Vertical distribution section of the H_z/H_y parameter value and a query result from GIS database

Laterális szerkezeti változások kutatása a fúrólyukbeli elektródás – bélésű-elektrodás – geoelektromos mérés szekunder mágneses komponenseivel (2. résztéma)

A fúrólyukak acél bélésűe alatti tápelektrodának – vagy magának a bélésűnek mint árambevezető elektródának – használata egyre gyakoribb témája a szakirodalomnak (Rocroi, Koulikov 1985, Asch, Morisson 1989, Szarka, Nagy 1992, Pellerin, Hohmann 1995, Takács et al. 1995, Ushijima et al. 1995, Takács et al. 2001). A széles frekvenciatartományú, bélésűes, fúrásfelszíni frekvenciaszondázás elindításában a 80-as évek végétől a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének úttörő szerepe volt (Takács, Hursán 1998, W. Yang et al. 2009).

1. Az áramforrást a felszíni elektródához és a bélésűhöz, illetve a fúrólyukbeli elektródához csatlakoztatva olyan elektromágneses tér hozható létre, amely kedvező sajátságú a fúrás környezetében előforduló laterális inhomogenitások térképezésére vagy a rétegsorban előálló vezetőképesség

változások időbeni megfigyelésére (Takács 1995). A módszer előnye a tisztán felszíni forrású méréshez képest a nagyobb kutatási mélység, továbbá az, hogy a felszínen mérhető mágneses komponenseket kizárólag a laterális inhomogenitások hozzák létre. A bélésűes gerjesztéssel ugyanis elérhető, hogy horizontális rétegződés esetén a primer térerősségnek nincsenek mágneses komponensei. Ez azzal jár, hogy a mélybeli laterális inhomogenitások kis adó-vevő távolságokkal – a fúrás közelében is – kutathatók.

A mágneses komponensek megjelenése tehát már önmagában utal a laterális inhomogenitások meglétére. Anomáliáik rajzolata azonban meglehetősen bonyolult, és emiatt a diszkontinuitások helyének pontosabb megadásához a mért adatok inverziójára van szükség.

Az elektrodinamika törvényei szerint a felszíni mágneses teret azok a vízszintes síkú, mélybeli áramrendszerek hoz-

zák létre, amelyeknek a primer tér által az inhomogenitások felületén létrehozott elektromos töltések a forrásai. Ezen áramrendszer függőleges irányú szakaszainak a felszínen nincs mágneses tere. Ebből következően az inverzió feladata nem más, mint az anomáliát okozó áramrendszert felépítő, felszín alatti, horizontális elektromos dipólusok sorozata helyének megkeresése.

2. Az OTKA T046765. téma keretében kidolgozott inverziós algoritmus alapfeltevései az alábbiak (Takács 2002, Szabó 2006, Takács, Pethő 2009).

Az inverzióba bevont, felszín alatti térfogatot elemi kockákra osztjuk. E térfogat laterális és mélységi kiterjedését a felszíni anomáliakép alapján – a szélső értékek helyzete, félértékű távolságok, térbeli hullámhossz – vagy földtani ismeretek alapján választjuk meg. Az elemi kockákon átfolyó áramot a kockák középpontjában x és y irányú horizontális elektromos dipólusmomentumokkal helyettesítjük. Ezek a keresett ismeretlenek. A momentumok térbeli eloszlása jelöli ki az inhomogenitás helyzetét, kontúráját.

A félteret homogénnek vehetjük fel, mert a mélybeli elektromos dipólus normált felszíni mágneses tere – például a legnagyobb értékére normálva – a kvázistacionárius esetben a vízszintes rétegződéstől is független. A rétegződésnek ugyanis csak a térerősség nagyságát befolyásoló hatása van. A normált, relatív értékek izovonalrajzolata a rétegződéstől független.

A következőkben példaként csak a kvázistacionárius vertikális mágneses térerősség inverziójával foglalkozunk. A felszíni mérési háló i -edik pontjában a felszín alatti j -edik cella közepén levő m_x^j és m_y^j horizontális, elektromos dipólusmomentum-komponensek a Biot–Savart-törvény szerint

$$dH_z^i = -m_x^j(y^j - y^i)(R^{ij})^{-3} + m_y^j(x^j - x^i)(R^{ij})^{-3}$$

vertikális mágneses térerősség-komponenseket hoznak létre, ahol $m_x^j = i_x^j dv$, $m_y^j = i_y^j dv$ és i_x , i_y az áramsűrűség-komponenseket, dv a kocka térfogatát,

$$R^{ij} = \sqrt{(x^j - x^i)^2 + (y^j - y^i)^2 + (z^j)^2}$$

a felszín alatti kocka (x_j, y_j, z_j) középpontja, és az $(x_i, y_i, 0)$ felszíni pont közötti távolságot jelenti.

A felszíni i . pontban az inverzióba bevont teljes térfogat összes cellájából eredő vertikális mágneses összetevő

$$H_z^i = \sum_{j=1}^M [-m_x^j(y^j - y^i)(R^{ij})^{-3} + m_y^j(x^j - x^i)(R^{ij})^{-3}]$$

lesz.

Legyen az ismeretlen horizontális elektromos dipólusmomentum-összetevők transzponált vektora az

$$\bar{\mathbf{m}} = (m_{x_1}^1, \dots, m_{x_M}^M, m_{y_1}^1, \dots, m_{y_M}^M)^T$$

vektor, a mért vertikális mágneses térerősségek transzponált vektora pedig a

$$\bar{\mathbf{h}} = (H_z^1, \dots, H_z^N)^T$$

vektor, akkor az előremodellezés művelete az

$$\mathcal{A}\bar{\mathbf{m}} = \bar{\mathbf{h}}$$

lineáris egyenletrendszerrel adható meg, ahol a $2 \times M \times N$ méretű \mathcal{A} mátrix, az előremodellezés operátora csak a geometriai adatok függvénye.

A dipólusmomentumokra kezdőértékeket véve fel kiszámítható a vertikális mágneses térerősség közelítő $\bar{\mathbf{h}}^c$ adatrendszere. Ennek a mért adatrendszerrel való eltérése pedig megadja az

$$\bar{\mathbf{e}} = \bar{\mathbf{h}} - \bar{\mathbf{h}}^c$$

hibavektort. Az inverziós eljárások szokásos sémája szerint az m_x^j , m_y^j modellparamétereket a hibavektor euklideszi normájának minimalizálásával határozzuk meg, ami a következő normál egyenletrendszerre vezet

$$\mathcal{A}^T \mathcal{A} \mathbf{m} = \mathcal{A}^T \mathbf{h}.$$

A normál egyenletrendszer iterációs megoldására a konjugált gradiens – CG – módszert használtuk az

$$\varepsilon \leq \|\mathbf{h} - \mathcal{A} \mathbf{x}\| / \|\mathbf{h}\|$$

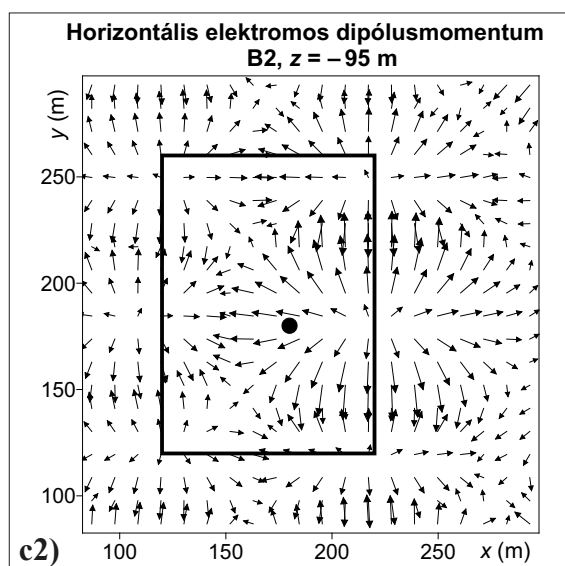
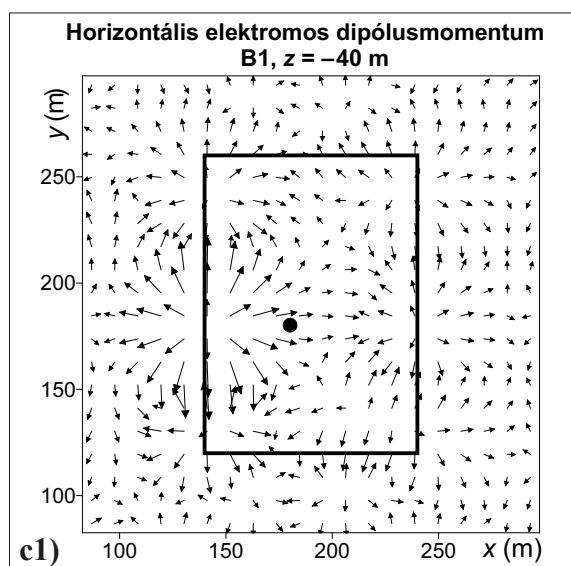
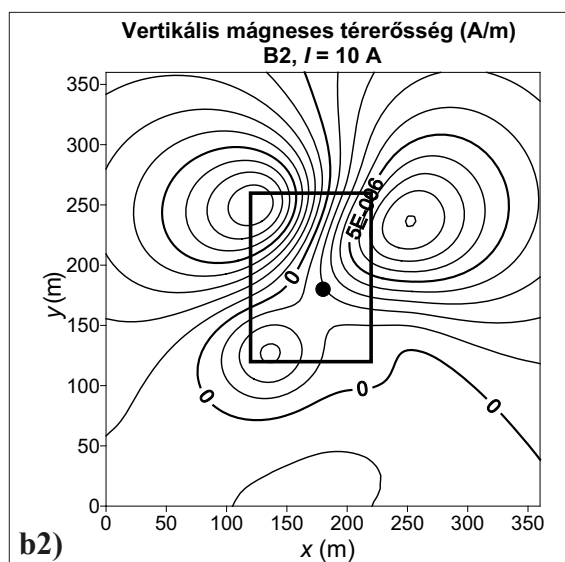
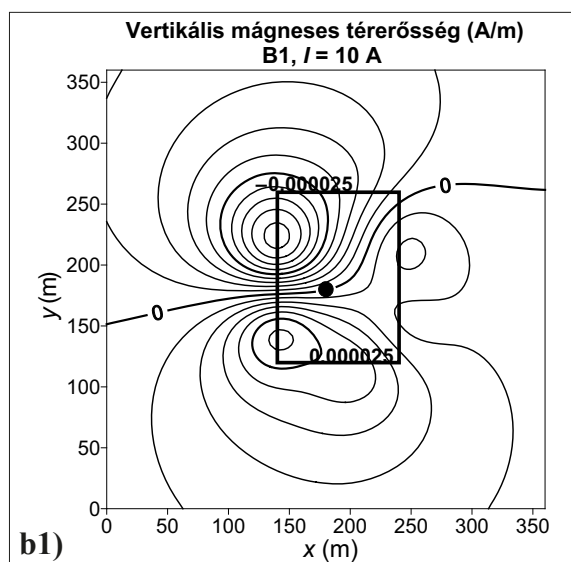
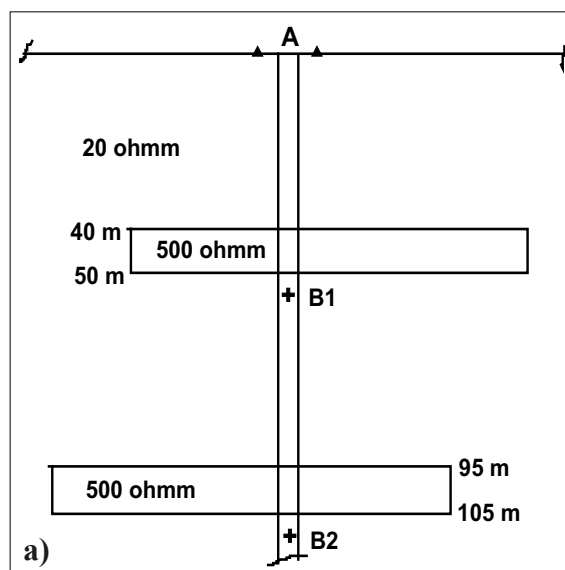
stop kritériummal, ahol ε egy megválasztott, kis értékű pozitív szám.

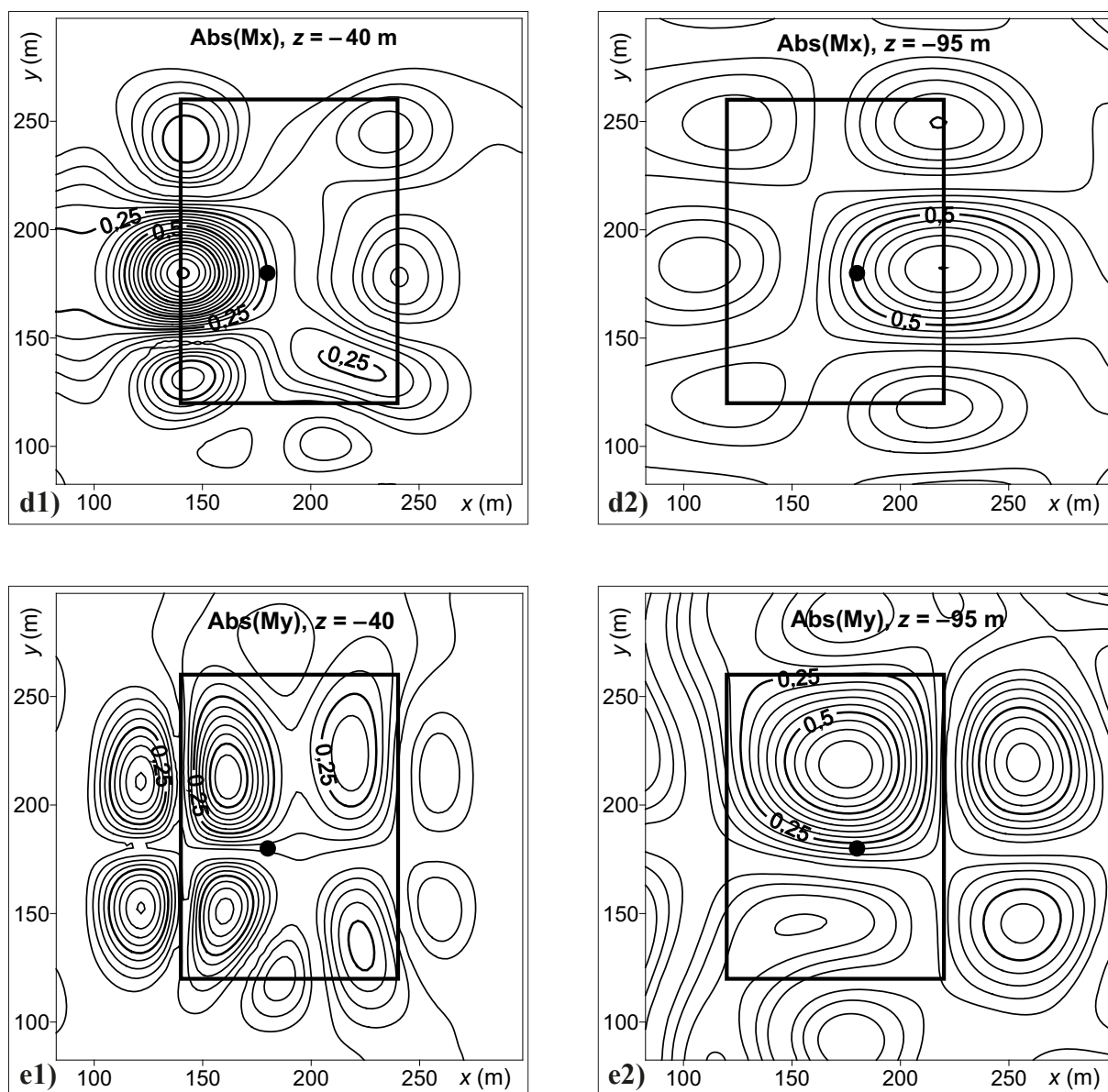
3. A béléscsőves gerjesztésnél a béléscsőbéli árameloszlás miatt a rétegsor legkisebb mélységben – a nagyobb áramsűrűségű térben – levő laterális inhomogenitásnak lesz domináló hatása a felszíni térerősségben. Az alatta levő laterális inhomogenitások csak nagyon kedvező esetben jelenhetnek meg elkülöníthető indikációval. Felszíni és fűrőlyukbéli tápelektrodákat használva viszont elérhető a laterális inhomogenitások mélységintervallumonkénti kutatása. A vizsgálatok szerint az acél béléscső alá, a cső sugarának ötszörösével mélyebbre helyezett tápelektrodával a béléscsőnek már nem lesz számottevő hatása a felszíni mérés eredményére. Így ez a mérés a fűrés folyamatok alatt többször megismételhető különböző mélységű tápelektrodákat használva.

A fentiekben leírt inverziós eljárás hatékonyságát a béléscső alatti tápelektroda használatának esetére mutatjuk be egy numerikus modellezési eredményre. A 2.a ábrán a 40 és 95 m fedőlapmélységű, vízszintesen eltolt helyzetű, a környezetükben nagyobb fajlagos ellenállású hasábok lényegében ferde vetőket szimulálnak. A fűrőlyukbéli elektródát először a felső, majd az alsó a hasáb alá juttatva a felszíni vertikális mágneses összetevőre először a $B1$, majd a $B2$ elektróda környezetének lesz meghatározó hatása. A vertikális mágneses komponens adatait – 2.b ábra – invertálva a fűrőlyukbéli elektródák mélységtartományára – $220 \times 220 \times 10$ m méretű hasáb – kapott horizontális áramsűrűségvektorok (2.c ábra), valamint x és y irányú összetevőik – 2.d és 2.e ábra – egyértelműen mutatják a felső és alsó hasáb elektródákhoz közelebbi 2-2 oldalapjának 20 m-rel eltolt helyzetét.

Az ábra szemlélteti a horizontális elektromos dipólusmomentumok indikációinak sajátosságait is. Például azt, hogy az oldalalpokra merőleges elektromos komponens az

oldallap mentén helyi szélsőértékek sorozatával, a lappal párhuzamos komponens pedig nulla értékű vonalakkal – illetve a momentumok abszolút értékénél minimumsávval – jelöli ki a lap helyét. Nyilvánvalóan az inhomogenitás kontúrvonala az áramsűrűség-változás lokális jellege miatt folyamatosan nem rajzolódhat ki. Az egyes oldallapokhoz tartozó indikációk mértéke az elektródától való távolságuk függvénye, és így markánsan a fűráshoz közeli szakaszok jelennek meg. A kisméretű inhomogenitásoknál a közeli oldallapok indikációinak szuperpozíciója bonyolíthatja a képet. 3 dimenziós inhomogenitás esetében kedvező, ha az nagyjából szimmetrikus a fűráshoz képest. A megnyúlt – 2 dimenziósnak tekinthető – szerkezeti elemek, vetők jelentik a legkedvezőbb esetet.





2. ábra A fúrólukbeli áramelektroda helyzetének szerepe a földtani információ mélység szerinti felbontásában

Figure 2 Function of the current electrode position in bore-hole related to draw the geological information in depth

Az IP módszer környezetvizsgálati célú továbbfejlesztése területén elért fontosabb eredmények (3. résztema)

Az IP (Indukált Polarizáció) módszer esetén elvégeztük a TAU-transzformációval előállítható időálló-spektrum inverziós számításának továbbfejlesztését. A lokális inverziós algoritmusok mellett vizsgáltuk a globális inverziós módszerek alkalmazhatóságát (Turai et al. 2010).

Megvizsgáltuk az időálló-spektrum Fourier-spektrumok segítségével történő meghatározásának a lehetőségét. Ez a lehetőség a szakirodalomból eddig nem ismert, alapvetően új inverziós utat jelenthet.

A korábbi terepi mérések (kommunális hulladéklerakók és szennyezett területek) adatainak újrafeldolgozása mellett

három szennyezett területen (Nyékládháza – 2006, Berekbőszörmény – 2007, Nagytétény – 2008) és egy zagytározón (Tiszapalkonya – 2004) új terepi méréseket is végeztünk.

A terepi mérések feldolgozásával kapott időálló-spektrumok alapján az időálló növekedésével a filtrációs, a membrán-, a redox és a fém polarizációk különíthetők el egymástól. Az időálló-értékek eloszlása alapján a polarizáció típusa becsülhető (Turai 2004) melyek földtani okait a 2. táblázat mutatja. A filtrációs polarizáció elektromosan vezető fluidumot tartalmazó porózus talajokban és

2. táblázat | A polarizáció típusa és a polarizáció földtani okai

A polarizáció típusa	A polarizáció földtani okai
filtrációs polarizáció	Elektromosan vezető fluidumot tartalmazó porózus talajok és kőzetek
membránpolarizáció	Diszperz agyagot és vizet tartalmazó porózus talajok és kőzetek
redox (elektrokémiai) polarizáció	Oxidatív, vagy redukzív hatású kémiai szennyezések
fémes (elektróda) polarizáció	Fémesem vezető anyagok ionosan vezető fluidumot tartalmazó kőzetekben

kőzetekben, a membránpolarizáció diszperz agyagtartalom jelenlétében, a redox polarizáció oxidációt, illetve redukciót okozó szennyezőanyagok esetén, míg a fémes (metallikus) polarizáció fémesen vezető talajkomponensek megjelenésekor lép fel.

Az eredmények igazolták, hogy a polarizációs szennyezettség mértékének a becslésére alkalmas az időállandóval súlyozott amplitúdóspektrum-érték (WAV – *Weighted Amplitude Value*). A szennyezettség okának vizsgálatakor megállapítható, hogy a kisebb időállandóval ($\tau < 1$ sec) jelentkező komponensek a környezetszennyezés szempontjából veszélytelen filtrációs és membránpolarizációkhoz köthetők, melyeket a talaj elektromosan vezető fluidumtartalma, valamint a diszperz agyagtartalma okoz. A környezetszennyezés szempontjából veszélyes elektrokémiai és fémes hatások okozta redox és metallikus (elektróda) polarizációk viszont nagyobb időállandójú ($\tau > 1$ sec) komponensekkel jelentkeznek. Az előzőek alapján tehát a környezeti szennyezés szempontjából veszélyesebb redox és fémes szennyezések által érintett térrészek lehatárolhatók, ezért a szennyezések fokának a jellemzésére bevezettük (Turai 2004) az időállandóval súlyozott amplitúdóértéket (WAV), amely a veszélye-

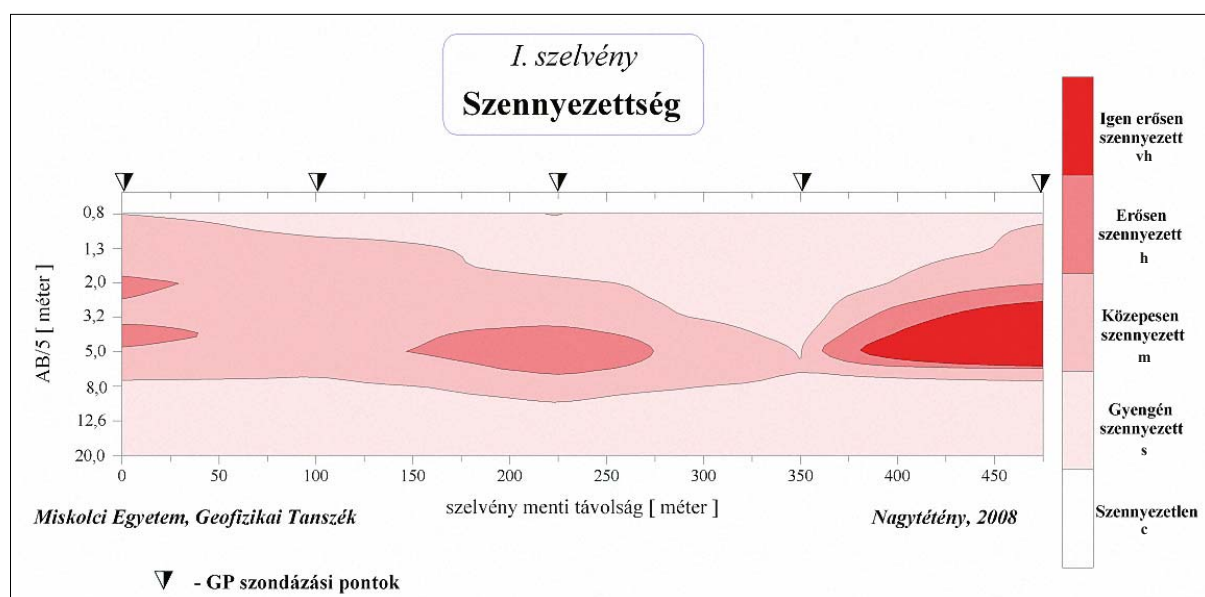
sebb polarizációk amplitúdóját növeli, a kevésbé veszélyes polarizációk súlyát pedig csökkenti:

$$WAV = \tau \cdot w(\tau).$$

A 3.1. ábrán a TAU-transzformáció után kapott WAV értékek alapján becsült szennyezettség vertikális metszete látható a nagytétényi kommunális hulladéklerakó felett. Az ábra azt mutatja, hogy a vizsgált hulladéklerakónál igen erős szennyezés is fellép. Az időállandó-értékek alapján megállapítható, hogy a polarizációt főként a fémes, fémsós szennyezettség okozta a diszperz agyagos és a redox hatások mellett (Turai et al. 2010). A tiszapalkonyai salakpernye zagyatározó felett számított WAV metszet (3.2. ábra) csak közepes szennyezettséget mutat, amely a membrán és a redox polarizáció (Turai et al. 2008) miatt alakult ki.

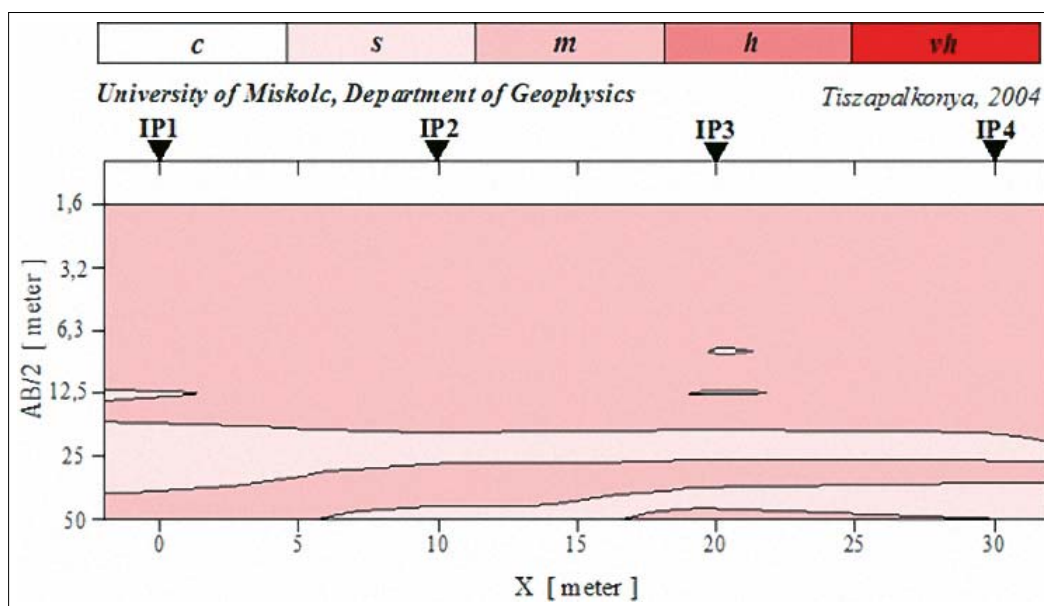
Bevezettük az időállandó-spektrum ($w(\tau)$) és a fajlagos elektromos vezetőképesség (σ) szorzataként a korrigált elektromos vezetőképességet (σ_{kor}), amely szintén alkalmas a szennyezett térrészek lehatárolására:

$$\sigma_{\text{kor}} = \sigma \cdot w(\tau).$$



3.1. ábra | Nagytétényi kommunális hulladéklerakó felett számított WAV metszet (szennyezetlen: $WAV < 2\%$, gyengén szennyezett: $2\% < WAV < 5\%$, közepesen szennyezett: $5\% < WAV < 10\%$, erősen szennyezett: $10\% < WAV < 20\%$, igen erősen szennyezett: $WAV > 20\%$)

Figure 3.1 | Vertical WAV section computed over the Nagytétényi communal waste site (vh: WAV is higher than 0.2, h: WAV is between 0.1 and 0.2, m: WAV is between 0.05 and 0.1, s: WAV is between 0.02 and 0.05, c: WAV is lower than 0.02)

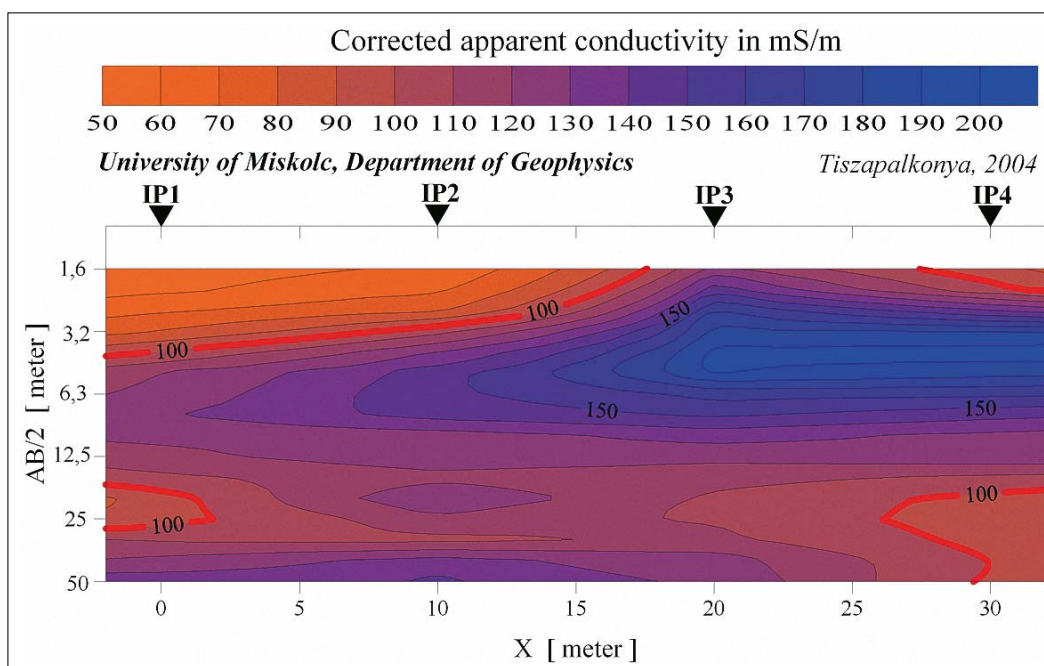


3.2. ábra A tiszapalkonyai salakpernye tározó felett számított WAV metszet (szennyezetlen: $WAV < 2\%$, gyengén szennyezett: $2\% < WAV < 5\%$, közepesen szennyezett: $5\% < WAV < 10\%$, erősen szennyezett: $10\% < WAV < 20\%$, igen erősen szennyezett: $WAV > 20\%$)

Figure 3.2 Vertical WAV section computed over the Tiszapalkonya slag ash site (vh: WAV is higher than 0.2, h: WAV is between 0.1 and 0.2, m: WAV is between 0.05 and 0.1, s: WAV is between 0.02 and 0.05, c: WAV is lower than 0.02)

A 3.3. ábrán a salakpernye-tározó esetében számított korrigált vezetőképesség vertikális metszetét mutatjuk be, piros színnel kiemelve a metszeten a 100 mS/m értékű izovonalat, amelytől nagyobb vezetőképességű térrészek jól korrelálnak a közepes szennyezettségű tartományokkal (3.2. ábra).

Más forrásból (kari) beszerzett multielektrodás geoelektromos és IP műszert (72 csatornás IRIS SYSCAL Pro) állítottunk üzembe (Turai és társai, 2010), amely a jövőben az OTKA-téma fejlesztési eredményeinek terepi alkalmazását jelentősen segítheti.



3.3. ábra A korrigált fajlagos vezetőképesség vertikális metszete (Tiszapalkonya, 2004)

Figure 3.2 Vertical section of the corrected apparent conductivity (Tiszapalkonya, 2004)

Hivatkozások

Az 1. résztémához kapcsolódó fontosabb publikációk a közlés időrendjében

- Vass P., 2004: 3D földtani-geofizikai adatrendszerek megjelenítési lehetőségei nyitott térinformatikai rendszer segítségével. MS-tézisek, Miskolci Egyetem Általános Informatikai Tanszék és Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék könyvtárai
- Vass P., 2005: Többdimenziós földtani-geofizikai adatrendszerek elemzését segítő saját fejlesztésű térinformatikai alapú szoftver. XXXVI. Ifjú Szakemberek Ankétja, Sarlópuszta, 2005. április 1–2., Konferenciakiadvány, 13–14. o.
- Vass P., 2005: A földtudományi oktatásban alkalmazható, többdimenziós adatrendszerek elemzését segítő térinformatikai alapú szoftver. XIV. Térinformatika az oktatásban szimpózium, Budapest, 2005. október 26., Konferencia CD kiadványa, 1–8. o.
- Vass P., 2005: Többdimenziós adatrendszerek elemzését segítő szoftver. 2005. Őszi Ifjúsági Előadói Nap, Miskolc, 2005. december 9.
- Barcsák G., 2006: GeoMedia WebMap alatti geoinformatikai rendszer fejlesztése. MS-tézisek, Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék könyvtára
- P. Vass, 2006: GeoMedia-based System Development for the Visual Analysis of Geological and Geophysical Data Sets. Intergraph Online Research Library, <http://synergy.intergraph.com/orl/catalog.asp?id=1937>, pp. 1–9
- Turai E., Dobróka M., Szabó N. P., 2006: Elektromágneses Inverzió vizsgálata 3D modellen. Inverziós Ankét 2006, MTA Miskolci Akadémiai Bizottság Székháza, 2006. március 20–21.
- Vass P., 2006: Saját fejlesztésű térinformatikai alapú szoftver alkalmazása földtani-geofizikai adatrendszerek elemzésében. X. Geomatematikai Ankét, Mórahalom, 2006. május 18–20., Internetes konferenciakiadvány, http://www.sci.u-szeged.hu/foldtan/geomatematikai_szakosztaly/abstracts_2006/VassPéter.pdf.
- Vass P., Turai E., Szabó N. P., 2007: GeoMedia-based System Development for water-base and analysis of oil contamination. microCAD'2007. Miskolc, 22–23 March 2007, Section B: Watermanagement and Environmental Protection, ISBN 978-963-661-744-8, pp. 167–172
- Turai E., Szabó N. P., Vass P., 2007: Analysis of Electromagnetic parameters for the application in Environmental Protection. III. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Kolozsvár, 2007. március 29–31., Konferenciakiadványa, Ábel Kiadó, 2007, ISBN 1842-9815, pp. 96–100
- Turai E., Szabó N. P., Vass P., 2007: Application Possibilities of Electromagnetic Parameters in Environmental Protection. XI. Geomatematikai Ankét, 2007. május 10–12., Mórahalom, Internetes konferencia kiadvány, http://www.sci.u-szeged.hu/foldtan/geomatematikai_szakosztaly/abstracts_2007/Turaiea.pdf
- Herczeg Á., 2007: A „GEO” adatok közzétételét támogató „GEO-MEDIA WEB MAP” alatti rendszer fejlesztése. MS-tézisek, Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék könyvtára
- Turai E., Dobróka M., Szabó N. P., 2007: 3D Electromagnetic inversion over a near surface oil contaminated model. Near Surface 2007, 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 3–5 Sept. 2007, Istanbul, Conf. CD, ISBN 978-90-73781-81-8, P31 pp. 1–5
- Herczeg Á., 2007: Geo-adatbázisok elérése, megjelenítése és feldolgozása Interneten keresztül. Doktoranduszok Fóruma 2007, Miskolci Egyetem, 2007. november 13., Miskolc
- Herczeg Á., 2008: Development of a Web based GIS solution for publishing the Hungarian Geophysical Exploration meta-data-

bases by GeoMedia WebMap Professional. Intergraph Online Research Library, <http://synergy.intergraph.com/catalogfiles/documents/2062.pdf>.

- Turai E., Szabó N. P., Vass P., 2008: Analysis of Electromagnetic Parameters for the Application in Environmental Protection. Intergraph Online Research Library, <http://synergy.intergraph.com/catalogfiles/documents/2063.pdf>.
- Dobróka M., Herczeg Á., Turai E., 2008: GIS supported soil contamination detection and characterization. microCAD'2008, Miskolc, 20–21 March 2008, Sect. A: Waste Processing, Recycling, ISBN 978-963-661-812-Ö, pp. 23–28
- Herczeg Á., 2008: Talajszennyeződés detektálásának és vizsgálatának támogatása geoinformatikai módszerekkel. XXXIX. Ifjú Szakemberek Ankétja, Baja, 2008. március 28–29., Konferenciakiadvány, 23–24 o.
- Dobróka M., Herczeg Á., Szabó N. P., Turai E., Vass P., 2008: GIS-based system development for processing and publishing geophysical data. IV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Debrecen, 2008. március 28–29., Konferenciakiadványa, REXPO Kft., ISBN 978-963-06-4625-3, pp. 112–117

A 2. résztémához kapcsolódó irodalomjegyzék

- Asch T., Morisson H. F., 1989: Geophysics 54, 235–244
- Pellerin L., Hohmann G. W., 1995: Geophysics 60, 43–52
- Rocroi J. P., Koulikov A. V., 1985: Geoph. Prosp. 33, 138–152
- Szabó I., 2006: Diplomater, Miskolci Egyetem
- Szarka L., Nagy Z., 1992: Acta Geod. Geoph. Mont. Hung. 27, 5–17
- Takács E., 1995: Acta Geodaetica, Geophysica Hung. 30/2–4, 331–341
- Takács E., Szarka L., Varga M., 1995: Magyar Geofizika 36, különszám, 60–64
- Takács E., Hursán G., 1998: Extended Abstracts of the papers presented by CEMI at 68. Annual SEG meeting, New Orleans
- Takács E., Nagy Z., Ferenczy L., 2001: Geosciences, Publ. Univ. of Miskolc, Series A, Mining 59, 153–190
- Takács E., 2002: Magyar Geofizika 43/3, 112–118
- Takács E., Pethő G., 2009: Acta Geod. Geoph. Hung. 44, 167–178

A 3. résztémához kapcsolódó fontosabb publikációk a közlés időrendjében

- Turai E., 2004: IP data processing results from using TAU-transformation to determine time-constant spectra. Geophysical Transactions 44/3–4, 301–312
- Turai E., 2004: Introduction to IP methods and interpretation in time-domain using TAU-transformation of IP curves. TÉT (SF-8/2001) finn-magyar továbbképző konferencia, 2004. 11. 8–12., Miskolci Egyetem, Miskolc, pp. 1–22
- Dobróka M., 2004: Introduction to geophysical inversion and combined application of the geophysical inversion and IP methods. TÉT (SF-8/2001) finn-magyar továbbképző konferencia, 2004. 11. 8–12., Miskolci Egyetem, Miskolc
- Turai E., Dobróka M., 2005: New results in the Waste Site characterization using TAU-transformation of Time-Domain IP Data. EGU General Assembly, Vienna, 24–29 April 2005., Conference CD, Abstract Number: EGU05-A-00835, pp. 1–2
- Turai E., Dobróka M., 2005: Hulladéklerakók jellemzése az IP adatok TAU-transzformációja segítségével (Characterization of the Waste Sites using TAU-Transformation of IP Data). Környe-

- zettudományi Konferencia, 2005. március 17–18., Kolozsvár, Konferencia CD, 1–25. o.
- Vass P., 2005: Fourier-transzformáció mint inverz probléma. Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 2005. november 9., Konferenciakiadvány, 120–127. o.
- Dobróka M., Vass P., 2006: A Fourier-transzformált inverziós előállítás. Inverziós Ankét 2006, MTA Miskolci Akadémiai Bizottság Székháza, 2006. március 20–21.
- Dobróka M., Vass P., 2006: A Fourier-transzformáció mint robusztus inverz feladat. A magyar EAGE csoport és az ELGI közös előadói napja, ELGI, Budapest, 2006. november 16.
- Turai E., Dobróka M., Vass P., 2006: Newer results in the Waste Sites Characterization using TAU-Transformation of IP Data. microCAD'2006 International Scientific Conference, Miskolc, 16–17 March 2006, Section B: Geoinformatics – Spatial Informatics, ISBN 963 661 700 7 Ö, pp. 57–62
- Turai E., Dobróka M., Vass P., 2006: Method Development for Waste Site Characterization Using TAU-Transformation of IP Curves. 68th EAGE Conference & Exhibition, Vienna, 12–15. June 2006, Extended abstracts, CD, ISBN 90-73781-00-0, Abstract-Number: H007, pp. 1–5
- Dobróka M., Turai E., Vass P., 2006: Solution of Near Surface Environmental Problems Using TAU-Transformation of IP Data. Near Surface 2006, 12th European Meeting of EEG, Helsinki, 4–6 September 2006, Extended abstracts, CD, ISBN 90-73781-62-0, Abstract Number: A019, pp. 1–5
- Dobróka M., Vass P., 2006: Fourier Transform as a Robust Inverse Problem. Near Surface 2006, 12th European Meeting of EEG, Helsinki, 4–6 September 2006, Extended abstracts, CD, ISBN 90-73781-62-0, Abstract Number: P069, pp. 1–5
- Vass P., Dobróka M., 2006: New method for the determination of Fourier transform of noisy data set. microCAD'2006 International Scientific Conference, Miskolc, 16–17 March 2006, Section B: Geoinformatics – Spatial Informatics, ISBN 963 661 700 7 Ö, pp. 63–68
- Turai E., 2006: A TAU transzformáció környezetvizsgálati alkalmazásainak eredményei. X. Geomatematikai Ankét, Mórhalom, 2006. május 18–20., Internetes konferenciakiadvány, http://www.sci.u-szeged.hu/foldtan/geomatematikai_szakosztaly/abstracts_2006/Turaiea.pdf.
- Turai E., Dobróka M., 2006: Hulladéklerakók jellemzése az IP adatok TAU-transzformációja segítségével (Characterization of the Waste Sites using TAU-transformation of IP Data). Környezettudományi Konferencia, 2005. március 17–18., Kolozsvár, Konferenciakiadvány, ISBN(10) 973-7953-69-X, ISBN(13) 978-973-7953-69-8, 337–348. o., pp. 445, 464
- Turai E., Dobróka M., Vass P., 2006: Az IP görbék Tau-transzformációját felhasználó módszer fejlesztése a hulladéklerakók jellemzésére. A magyar EAGE csoport és az ELGI közös előadói napja, ELGI, Budapest, 2006. október 12.
- Vass P., 2006: Zajos adatsorok frekvencia spektrumának meghatározása inverziós módszerek segítségével. MGE XXXVII. Ifjú Szakemberek Ankétja, Balatonkenese, 2006. március 31. – április 1., Konferenciakiadvány és CD, 32–33. o.
- Vass P., 2006: Zajos adatsorok frekvencia spektrumának meghatározása inverziós módszerek segítségével. Földtani Kutatás internetes szakmai folyóirat, 2006. II. szám, www.foldtanikutatas.hu, 1–17. o.
- Vass P., 2006: Zajos adatsorok frekvencia spektrumának meghatározása inverziós módszerek segítségével. Geofizikai – Földtani – Környezetvédelmi Vándorgyűlés és Kiállítás, Zalakaros, 2006. szeptember 21–23., 32–33. o.
- Vass P., 2006: Inverziós módszerek alkalmazása a frekvenciaspektrum előállítására, Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem, 2006. november 9., Miskolc
- Vass P., 2007: Determining the frequency spectrum of noisy data sets by geophysical inversion method. 6th International Conference of PhD students, Miskolc, 12–18 August 2007, Conference Book, pp. 167–173
- Dobróka M., Herczeg Á., Turai E., 2008: GIS supported soil contamination detection and characterization. microCAD'2008 Miskolc, 20–21 March 2008, Sect. A: Waste Processing, Recycling, ISBN 978-963-661-812-Ö, pp. 23–28
- Herczeg Á., 2008: Talajszennyeződés detektálásának és vizsgálatának támogatása geoinformatikai módszerekkel. XXXIX. Ifjú Szakemberek Ankétja, Baja, 2008. március 28–29., Konferenciakiadvány, 23–24. o.
- Turai E., Dobróka M., Vass P., 2008: TAU-transformation of Time-Domain IP data measured over a slag ash site. IV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Debrecen, 2008. március 28–29., Konferenciakiadvány, REXPO Kft. 2008., ISBN 978-963-06-4625-3, pp. 269–274
- Turai E., Gyulai Á., 2008: Salakpernye-tároló geoelektromos vizsgálata. Inverziós Ankét 2008, MTA Miskolci Akadémiai Bizottság Székháza, 2008. április 28–29.
- Turai E., Dobróka M., Takács E., Ormos T., 2008: Newer Results of Environmental Analysis Using TAU-transformation of Time-domain IP Data. 70th EAGE Conference & Exhibition, 9–12 June 2008, Rome, Extended Abstracts, CD, ISBN 978-90-73781-53-5, Abstract Number: P088, pp. 1–5
- Turai E., 2009: A geofizika szerepe a szennyezett területek lehatárolásában és állapotvizsgálatában. A Kármentesítés Aktuális Kérdései c. konferencia, 2009. április 22–23., Budapest, Konferenciakiadvány, Környezetvédelmi Szolgáltatók és Gyártók Szövetsége, 2009., ISBN 978-963-88125-1-3, 13–15. o.
- Turai E., Herczeg Á., 2010: Az IP módszer környezetvédelmi alkalmazási eredményei (Application results of IP method in the field of environmental protection). VI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Nyíregyháza, 2010. április 22–24., Konferenciakiadvány, Bessenyei György Könyvkiadó 2010, ISBN 978-963-9909-57-1, 265–270. o.
- Turai E., Dobróka M., Herczeg Á., 2010: Sorfejtéses inverzió III – Gerjesztett polarizációs adatok inverziós feldolgozása. Magyar Geofizika 51/2, 88–98

Megemlékezés és jubileumi tudományos ülésszak az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék alapításának 60. évfordulója alkalmából

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem 2010-ben ünnepelte alapításának 375. évfordulóját. Szintén ebben az évben volt a 60. évfordulója annak, hogy az egyetem a világhírű fizikusnak, a geofizika mint tudományág megalapítójának, az MTA néhai elnökének a nevét viseli. Ez a kettős évforduló adta a keretet ahhoz, hogy a Geofizikai Tanszék alapításának a 60. évfordulójáról is megemlékezzünk annak ellenére, hogy a tanszék 1951-ben alakult meg, s így hivatalosan csak 2011-ben jubilál.

Az ünnepi megemlékezést 2010. december 10-én tartottuk az ELTE egyik diákokkal és kollégákkal zsúfolásig megtelt nagy előadótermében. A megnyitót *Szabó Mária* professzor, a Földrajz- és Földtudományi Intézet igazgató-nője tartotta. Ebben kiemelte, hogy geofizikai kutatás és oktatás az egyetemen a XX. század eleje óta folyik, hiszen Eötvös Loránd munkásságát *Rybár István*, a Gyakorlati Fizikai Tanszék vezetője folytatta. Továbbá az egyetemen tanított *Kövesligethy Radó* is, a Kozmográfiai Intézet alapítója, aki a csillagászat mellett a földrengéshullámok terjedési törvényeinek felismerésével a geofizika fejlődéséhez is hozzájárult. Ma a Geofizikai és Űrtudományi Tanszék az általános és gyakorlati geofizikai kutatások mellett több száz földtudomány, földrajz és környezettudomány szakos hallgató oktatását végzi, így szervesen kapcsolódik az egyetemi képzési rendszerbe.

A megnyitó után 15 perces előadások következtek, melyek a tanszéken folyó kutatásokat mutatták be tömören. Az előadások az elhangzás sorrendjében a következők voltak:

Timár Gábor, Székely Balázs, Molnár Gábor:

A Balaton legnagyobb kiterjedésének rekonstrukciója digitális domborzati modellek és a függőleges felszínmozgások alkalmazásával

Drahoš Dezső, Balázs László:

Mérnökgeofizikai szondázások inverziója

Lenkey László, Pethe Mihály, Lipovics Tamás, Petrovski Judit:

Régészeti célú geofizikai mérések Porolissumon

Kis Károly, Wittmann Géza:

A CHAMP mesterséges hold gravitációs és mágneses méréseinek értelmezése a Pannon-medencében

Galsa Attila, Herein Máttyás, Lenkey László:

Globális geodinamikai folyamatok: köpenyáramlások numerikus modellezése

Tóth Tamás:

Vízi szeizmikus mérések jelentősége a szerkezeti kutatásokban

Horváth Ferenc, Dombrádi Endre:

A Pannon-medence új geodinamikai modellje

Márton Péter akadémikus, professzor emeritus az előadásokat követően felsorolta a Geofizikai és Űrtudományi Tanszék nagy hagyományokkal rendelkező kutatási területeit. A tanszék történetéből és az oktatás szerkezetéből fakadóan ezek egy része általános geofizikai jellegű, és a Föld belső szerkezetének és folyamatainak a megértését célozza. Közülük a legfontosabbak a földi mágneses tér megismerése archeo- és paleomágneses, valamint műholdas mérésekkel, modellezéssel és geofizikai inverzió segítségével, a köpenyáramlások modellezése, a Pannon-medence kialakulásának vizsgálata és az ionoszféra kutatása. A tanszék másik profilja mérési módszerek és feldolgozási eljárások fejlesztése a geoelektromos, mágneses, szeizmikus, mélyfúrás-geofizikai és távérzékelési mérések területén, valamint ilyen mérések végzése földtani, mérnöki és régészeti céllal. A záróban a *Márton* professzor megemlítette, hogy az évforduló alkalmából rendezett előadássorozat kitűnő lehetőséget adott arra, hogy bemutassuk az elmúlt tíz évben a fenti területeken bekövetkezett fejlődést és a legújabb eredményeinket.

A megemlékezés zárásaként családias hangulatú fogadást tartottunk a tanszéken, az Egyed László-teremben, ahol a kollégák, tanárok és a diákok együtt ünnepelték a tanszék alapításának évfordulóját.

Lenkey László

Megemlékezés és kiállítás a Miskolci Egyetemen

Csókás János professzor halálának 10. évfordulóján

Csókás professzor 2000. november 24-én távozott el tőlünk. A Miskolci Egyetemen hagyomány, hogy az Alma Mater kiváló professzorairól haláluk 10. évfordulóján kiállítással emlékeznek meg. A 2011. jan. 20-i megemlékezést *dr. Dobróka Mihály* intézetigazgató professzor nyitotta meg. Beszédében méltatta Csókás professzor közel 30 éves tanszékvezetői munkásságát, mely a jelenlegi miskolci geofizikai oktatásra és kutatásra is pozitívan kihat. Széles területet lefedő kutatásai közül kiemelte a bányabeli körülményekre kifejlesztett, nemzetközileg is elismert geoelektromos telepszondázási módszer és műszer fejlesztését. Elmondta, hogy a tanszék nemzetközi kapcsolatait példamutatóan fejlesztette, melyek közül a legfontosabb a bochumi Ruhr Egyetem Geofizikai Intézetével folytatott kutatás. Csókás professzorról legközvetlenebb munkatársai közül ezt követően *dr. Gyulai Ákos* egyetemi tanár emlékezett meg, beszédét alább változtatás nélkül közöljük. Az Egyetemtörténeti Bizottság részéről *dr. Böhm József* elnök elevenítette fel a professzor sokoldalú egyéniségét. Az MGE volt elnökei közül *dr. Kiss Bertalan*, *dr. Késmárky István*, *dr. Ormos Tamás*, *Pályi András*, *dr. Tóth József*, *dr. Gombár László* tisztelte meg jelenlétével a megemlékezést. Az egyetem részéről *dr. Kovács Ferenc* korábbi rektor és dékán, *dr. Patkó Gyula* jelenlegi rektor és *dr. Tihanyi László* a Műszaki Földtudományi Kar dékánja is jelen volt.

A tablókon és vitrinekben kiállított anyag Csókás János életútját, több személyes tárgyát, oktatási és kutatási tevékenységét, az irányítása alatt fejlesztett módszerek és műszerek egy részét, egyetemi és közéleti elismeréseit, kitüntetéseit mutatta be. A kiállítási anyag összegyűjtése és megjelenítése *dr. Ormos Tamás* tanszékvezető egyetemi docens munkáját dicséri.

A geofizikus mérnökképzés hazai rendszere Csókás professzor vezetésével alakult ki. Ez a rá jellemző jó szervezői készség másrészt az ő – és kollegái – aktív jegyzetírói tevékenysége nélkül nem lehetett volna sikeres. A kiállított oktatási anyagok között megtalálható volt a *Bencze Pállal* közösen írt jegyzetei (ezek 1953-ban és 1954-ben jelentek meg) éppúgy, mint a Mélyfúrás Geofizika c. jegyzetének 1993 évi kiadása is. Összesen 11 egyetemi jegyzetnek volt a szerzője.

Kiváló kutatói képességeit a szabadalmi és az ötleteit követő gyakorlati megvalósítások egyaránt bizonyítják: mintegy 250 műszer vagy műszeregység készült el munkatársai közreműködésével. Az elért kutatási eredményeket több mint száz tudományos közleményben publikálta. Ezek között – a bányageofizikai telepszondázás mellett – meg kell említeni a fűrőiszapban oldott gázok detektálására kifejlesztett mérési módszerét is, továbbá a fűrőlyukbeli izotermális remanens mágnesezettség és mágneses szuszceptibilitás mérése terén a kollégáival együtt elért eredményeit is. Fűrőmagok dinamikus rugalmassági állandóinak meghatározására módszert vezetett be és laboratóriumot hozott létre. A szivárgási tényező meghatározására is új eljárást fejlesztett ki. Archeológiai célú geofizikai méréseket ő végzett elsőként az országban. Tanszéki kutatások alapján tűzték ki a Miskolci Egyetem mellett lévő termálkút helyét. A Geofizikai Tanszék jugoszláviai bányageofizikai expedíciójának megszervezése is az ő nevéhez fűződik. A kiállításon fotók, műszerek, tanulmányok dokumentálták az elért eredményeket.

Nemcsak nekünk, tanítványainak vagy munkatársainak, hanem a bennünket követő generációk számára is példakép lehet az intuitív, nagy munkabírási, több területen is kiváló eredményeket elérő, az Egyed László Emlékéremmel (1986) és az Eötvös József Koszorúval (1998) is kitüntetett tudós.



Emlékezés Csókás János professzor halálának 10. évfordulóján

Gyulai Ákos professzor megemlékezése

Tisztelt Emlékezők!

„Nem azok a legfontosabb emberek, kiknek jelenlétét mindig észre vesszük, hanem kiknek hiányát nagyon is megérezzük”. Csókás János professzor még ma is hiányzik nekünk, pedig már tíz éve múlt, hogy csak emléke él közöttünk.

Megélve hétköznapijainkat és ünnepeinket gyakran gondolunk megboldogult szeretteinkre, barátainkra. Oly sokan és sokféleképpen fogalmazták meg életünk, mindennapijaink kapcsolatát múltunkkal és elődeinkkel. Minden ilyen megfogalmazásban talán az a közös, hogy az egész életünk, eredményeink, sikereink mindig a múltban gyökereznek. Akik nem képesek az ősről vagy elődeikről emlékezni, azok nem képesek saját hétköznapijaikban és ünnepeikben az igazi örömeiket megtalálni és megélni. Érdemes tehát emlékeznünk szűkebb és tágabb családjaink, munkatársaink elhunyt tagjaira, mert ilyen alkalmakkor újra együtt lehetünk velük, legalább is gondolatainkban.

Kedves Emlékezők, Csókás János professzor munkatársai és egykori munkatársai, valamint egykori diákjai!

Most azért jöttünk össze, hogy visszatekintsünk a múltba és emlékezzünk kedves és tisztelt egykori professzorunkra, Csókás Jánosra – ma már azt is mondhatjuk – szeretett János bátyánkra. S hogy milyen gyorsan rohan az idő, ezt az is mutatja, hogy megemlékezésünket Csókás professzor elhunytának már tízéves fordulóján tartjuk. Csókás professzor temetése 2000. december 11-én a Farkasréti temetőben volt. Utolsó útjára – milyen könnyörtelenül hangzik – családja, barátai, tanítványai és munkatársai kísérték. Hogy milyen nagy veszteség volt halála, azt az is mutatta, hogy búcsúztatásán nagyon sokan vettünk részt geofizikusok, geológusok és bányamérnökök egyaránt.

Csókás János professzor a budapesti Református Gimnáziumban érettségizett 1937-ben. Egyetemi tanulmányait a budapesti Pázmány Péter Tudományegyetem Bölcsészettudományi Karán végezte, ahol 1943-ban tanári oklevelet szerzett. 1941-től a Magyar Amerikai Olajipari Rt.-nél dolgozott praktizáló geofizikusként, majd rövid ideig a Nehézipari Minisztériumban. Azután 1950-től a Soproni Műegyetem Fizikai, majd Geofizikai Tanszékén dolgozott. Egyik alapító tagja volt az 1951-ben Sopronban megalakult Geofizikai Tanszéknek, amelynek vezetője lett *Kántás Károly* külföldre történő távozása után. Közben egy rövid ideig a MÁELGI igazgatóhelyettese is volt. A Bányamérnöki Kar Miskolcra helyezésével családjával Miskolcra költözött, ahol 1983-ig, majd három évtizeden át, 65 éves koráig vezette a Geofizikai Tanszékét. Kedves, törekeny felesége volt, aki magára vállalta két fiúgyermekük áldozatos nevelésének legnagyobb részét. Ő is pedagógus volt, akit tanítványai rajongásig szerettek.

Csókás professzor nyugállományba 1988-ban vonult, azonban még évekig részt vett a Geofizikai Tanszék oktatási-kutatási tevékenységében.

Csókás professzort a szigorú, de emberséges tanárt kedvelték, szerették és tisztelték tanítványai.

Egyelőre ennyit említek a száraznak tűnő életrajzi adatokból. Sokkal szívesebben beszélek azonban Csókás Jánosról, az emberről, akinek még egyetemi diákként hallgattam előadásait. 1971-ben egyik közvetlen munkatársa lehettem a Geofizikai Tanszékre kerüléssel. (Elárulom, hogy ez már a harmadik munkahelyem volt, és meg is maradt annak.) Több fiatal kezdő oktató került abban az időben a Tanszékre. Nem volt könnyű megszokni Csókás professzor rendkívüli munkabírását, igényességét, az élet, a munka minden területén. Akkor még nem tudtuk, talán nem is éreztük, hogy a kemény, sokszor éjszakáig tartó, fegyelmezett munka, hogyan képes megedzeni, alakítani az embert. Hogyan válhat az ember a szakma, az oktatás és kutatás elkötelezett hívévé, s talán nem túlzás, megszállottjává. De hiszen ő maga is megszállott emberként élt, akinek mindene a Geofizikai Tanszék volt. Akkor még azt sem értettük mindig, hogyan válhat valakinek a munkája igazi passziójává, öröme és sikerek forrásává.

Ma már tudjuk, hogy ez az időszak nemcsak azért volt szép és fontos életünkben, mert még mindnyájan fiatalok voltunk, hanem azért is, mert volt kitől megtanulnunk a szakma szeretetét. Nem túlzás azt mondani, hogy mi is – Csókás professzorhoz és idősebb munkatársaihoz hasonlóan – megszerettük a Geofizikai Tanszékét, melyet azóta is féltően fejlesztünk és óvunk. Ezt a gondolkodást és életmódot szeretnénk továbbadni az utánunk jövő fiataloknak is.

Engedjenek meg még egy gondolatot tele szubjektivitással! Számtalanszor tartok előadásokat abban a teremben, amelyet Csókás professzorral neveztünk el. A képe ott van a bejárat mellett, s a terem egyik sarkában az Eötvös-ingával. S a szünetben olykor fáradtan rájuk gondolok. Hiszen lehet-e az egész geofizikáról báró Eötvös Loránd nevének említése nélkül beszélni, vagy lehet-e a Geofizikai Tanszékre Csókás János említése nélkül gondolni, aki a Tanszék történetének mintegy fele részében volt annak vezetője. Mi, az utódok büszkéek vagyunk a szakmánkra, annak múltjára, a sok-sok nagy elődre és persze mindazon élőkre is, akik hozzájárultak és hozzájárulnak ahhoz, hogy a geofizika egy évszázad alatt oly nagymértékben fejlődött, és fontos szereplője lett a földtudományok nagy családjának. A geofizika tudománya szerteágazódott, és az általános geofizika mellett az alkalmazott geofizika nagyon sok részterülete fejlődött ki. A nyersanyagkutatás mellett a mérnök-geofizika, az archeogeofizika, a bányageofizika, a környezetgeofizika, a hidrogeofizika sajátos specialitásai alakultak ki, mind a műszerek, a geofizikai mérések, mind a geofizikai adatok feldolgozási, értelmezési módszerei területén. Ezek mindegyikében maradandót alkotott Csókás János professzor.

A magyar geofizika nemcsak a modern geofizika kezdetét jelentő Eötvös Loránd munkásságához kapcsolódóan hozott

nemzetközi sikereket, hanem a későbbi évtizedekben az előbb felsorolt sok-sok területen. Csókás János professzort egész életében a kezdeményezőkézség jellemezte. Erre sarkalta, ösztönözte munkatársait. Ma már tudjuk, hogy az ő munkássága nélkül szürkébb lenne a múltunk mellett a mai szakmai életünk is. Sok-sok eredményünk biztosan meg sem született volna. Nemcsak közvetlen munkatársaira volt nagy hatással egyénisége, hanem az egész hazai szakmára és szakmai közéletre. Ezért is tartjuk fontos példaképünknek, akit egy dologban biztosan minden geofizikusnak érdemes követni, s ez a szakma rendíthetetlen szeretete.

Az eredményeit, a gazdag életművet – melyet a kiállítás legalább részben megpróbál bemutatni – nagyra értékelte a szakma. 1959-ben szerezte meg a műszaki tudomány kandidátusa fokozatot, majd 1980-ban a műszaki tudomány doktora fokozatot. Sok-sok tudományos eredménye közül csak egyet emelnék ki. Bányageofizika témakörben olyan új geo-

elektromos módszer elméletét dolgozta ki, amely iránt ma is van nemzetközi érdeklődés, illetve amelyre történnek nemzetközi hivatkozások. Ezek közül egy publikációt a kiállításon is bemutatunk a jelentős kínai bányászat területéről. S ha a Geofizikai Tanszék munkatársai még egyszer eljutnak Kínába – korábban ez egyszer már *Takács* professzorékkal megtörtént –, ennek alapjait Csókás professzor munkássága teremtette meg.

Életműve gazdagságát talán a kiállítással sikerül érzékeltetnünk, beleértve ebbe tudományos közéleti tevékenységét is. És talán sikerül felvillantatunk valamit Csókás professor hétköznapijaiból is.

Sokan és sokat köszönhetünk neki. Ez alkalommal meghatottan emlékezünk rá volt munkatársai és tanítványai. Örök világosság fényeskedjék neki!

Miskolc, 2011. január 20.

Pethő Gábor



A képeket *dr. Ormos Tamás* készítette.

A 2010. évi PRO GEOPHYSICA Emlékérmek átadása

Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) Borbála napi ünnepe (intézeti bányásznapi) mindig megmozgatja a kollégák fantáziáját. Egyrészt azért, mert az ünnepség lehetőségét ad a PRO GEOPHYSICA kitüntetések átadására (tulajdonképpen mindig – immár 14. alkalommal – ez a fő napirendi pont), másrészt az ünnepség időpontja körül kialakult bizonytalanságok miatt. Ez utóbbi a helyi adottságokon túl abból is következik, hogy össze kell hangolni az időpontokat a meghívni kívánt intézmények bányásznapi rendezvényeinek idejével.

Így került az ünnepség december 16-ára, ami azt jelentette, hogy a rendezvény egyfajta „év végi összetartás” szerepét is betöltötte.

A nagy előzetes egyeztetések ellenére meghívott vendégeink többsége nem tudott eljönni, ami azt bizonyítja, hogy az év vége felé nem feltétlenül célszerű törekedni az összehangolásra, hiszen az élet átírhat minden előzetes gondolatot.

Mindezek ellenére a Konferenciaterem zsúfolásig megtelt. Ennek azért voltak előzményei. Ugyanis az október végi „Felhívásra”, hogy kiket javasolnak PRO GEOPHYSICA kitüntetésre, minden eddiginél több kitüntendő neve érkezett. Így a szavazatok száma mellett sok más egyéb szempontot is érvényesíteni kellett a kiválasztásnál.

Az ünnepség remek hangulatban zajlott le. A kitüntetések és az év folyamán nyugdíjba vonulókról szóló megemlékezések után ünnepi fogadás volt. A fogadást jó hangulatú, meleg, barátságos beszélgetések jellemezték, tették kedvesé, emberivé. Erről tanúskodnak a Vámos Judit által készített kitűnő fényképek, amelyek az ünnepség egy-egy érdekes pillanatát örökítették meg. A kitüntetettek közül *Tasnádi Henrikné (Zsuzsa)* halaszthatatlan családi elfoglaltsága miatt sajnos nem tudott részt venni.

A PRO GEOPHYSICA Emlékérmet 2010-ben – betűrendben – az alábbiak kapták:

*Gömböcz Lajos,
Dr. Kiss János,
Kummer István,
László István,
Magyar Balázs,
Repka Lajos,
Somogyi Sándor,
Tasnádi Henrikné,
Dr. Törös Endre*

Gömböcz Lajos

1948-ban született Kapuváron. Középiskolai tanulmányait a budapesti I. István Gimnáziumban végezte. 1971-ben, az egyetem (Eötvös Loránd Tudományegyetem, matematikai szak) elvégzése után került az Intézet (ELGI) Szeizmikus

Elméleti Osztályára, ahol bekapcsolódott az intézet által fejlesztett, lényegében akkor induló, digitális, szeizmikus feldolgozó programrendszer kialakításába és működtetésébe. Hét éven keresztül dolgozott ezen a területen.

Szeizmikus jellegű algoritmus- és szoftverfejlesztései közül leginkább alábbi két feladatot érdemes említenünk:

- a Velocity Spectra eljárás kidolgozása és implementálása a MINSZK–32 gépre,
- a tengeri mérő- és feldolgozórendszerben migrációs eljárás Kirchhoff-változatának eredményes megvalósítása.

Közel két évtizedes távollét után, 1996-ban tért vissza a Geofizikai Intézetbe, itt modernebb körülmények között, a Promax-Sun feldolgozórendszer keretében, ismét a szeizmikus feldolgozás területén dolgozott. Ebben az időszakban szoftverfejlesztéseivel hatékonyan lerövidítette a szeizmikus vonalakat definiáló geometriák időigényes leírását. Megvalósított egy eljárást, mely lehetővé tette a Promax adatbázisok gyors, tükörképszerű kinyerését és annak más, PC-s alkalmazásokba való átvitelét. Sekélyszeizmikus karotázsmérésekhez félautomatikus kiértékelő eljárást szerkesztett, mely végeredményként előállította a mérési helyekhez rendelhető sebességfüggvényeket. A Promax feldolgozó rendszerre átültetett egy koherens jeleket kiemelő eljárást, melyet a szovjet SZCSZ–3 rendszerben fejlesztettek ki. Az intézet ezt az eljárást napi használatban alkalmazta.

Az utóbbi években tevékenységének súlyponti részét a mágneses anyagokon tárolt szeizmikus adatok korszerű adathordozóra való átmentése képezte. 2010-ben nyugdíjba ment.

Dr. Kiss János

1962-ben született Tatabányán. Középiskolai tanulmányait a tatabányai Szabó József Geológiai Szakközépiskolában 1980-ban fejezte be és 1981-ben a katonai szolgálat után a leningrádi Bányászati Egyetem ércgeofizikus szakán folytatta (1981–1986). Terepi szakmai gyakorlatokon a Kaukázusban ércet, Jakutföldön kimberlitkürtöket kutatott, s ez utóbbi témából, a jakutföldi gyémánt lelőhelyek részletező mágneses kutatásáról írta diplomamunkáját is.

Az egyetem elvégzése után a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetbe (ELGI) került, ahol kezdetben a sekélygeofizikai mérésekkel foglalkozott (bauxitkutatás, mérnökgeofizikai mérések), majd a légi geofizikai mérésekkel, azok feldolgozásával, értelmezésével, valamint a digitális légi adatok kezelésével. Itt kezdett el foglalkozni a modern potenciáltér-adatok automatikus feldolgozási eljárásaival, valamint a térképi adatrendszerek képfeldolgozásával is.

1995-től 2000-ig a Légigeofizikai és Távérzékelési Laboratórium vezetője volt az ELGI-ben. A térinformatikai alapú

integrált értelmezésekbe a LANDSAT és SPOT űrfelvételeket is bevonták (Paks, Tokaji-hegység, Mátra).

2000-ben a TÉT alapítvány támogatásával elnyert egy pályázatot, amely lehetővé tette, hogy az amerikai Ohio State University – Byrd Polar Research Center sarkvidéki kutatási központba utazzon, rövid időre bekapcsolódva az Antarktisz „TAMARA” kutatási projektjének légi mágneses adatfeldolgozásába.

Több OTKA-témában dolgozott közreműködőként, így pl. 1995–1996: „Távérzékelési adatok neotektonikai értelmezési lehetőségeinek vizsgálata”, 1997–2000: „A Tokaji-hegység paleovulkáni újraértékelése”, 2003–2006: „Magyarország gravitációs lineamens térképe” és 2007–2010: „Mágneses fázisátalakulás a földkéregben és geofizikai következményei”.

2001-től a „Légi geofizikai adatbázisok és paraméterterképek” és a „Gravitációs és mágneses adatbázisok és paraméterterképek” téma vezetőjeként dolgozott. 2004-től az adatbázisok kezelése mellett alaptérképek készítése és az erőter-geofizikai módszerfejlesztési feladatok is hozzá tartoznak. A módszerfejlesztési eredményeit több cikkben is olvashattuk a *Magyar Geofizikában*, 2005-ben és 2006-ban megjelent cikkei az év cikke díjat nyerték el. Szakmai tevékenységének eredménye az új országos 500 000-es méretarányú geofizikai térképek (Bouguer-anomália és mágneses ΔZ anomáliatérképek) nyomdai megjelenése is, valamint a KINGA internetes portálon is megjelenő 100 000-es geofizikai térképsorozat.

Több kisebb expedíciós munkában is részt vett, mint pl. Törökország (1992), Németország (1992), Oroszország (1993), Ausztria (1995 és 1996), Albánia (2005), Mongólia (2007).

2003-ban jelentkezett a Nyugat-magyarországi Egyetem doktori képzésére, ahol a tanulmányai során, a feladatok elvégzésével kapcsolatosan több új szakmai problémával is kezdett el foglalkozni. Ilyenek voltak a „Mágneses fázisátalakulás jelensége”, a „Gravitációs tér és a vizes élőhelyek kapcsolatának vizsgálata” vagy a „Regionális gravitációs anomáliák, izosztatikus hatások Magyarországon” témakör vizsgálata.

2009-ben megszerezte a „Környezettudományok doktora” címet a Nyugat-magyarországi Egyetem, Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola Geokörnyezettudományi programjának keretében. Doktori dolgozata a gravitációs és mágneses módszerek alkalmazásáról és a CEL-7 és CEL-8 litoszférakutató szeizmikus szelvények mentén végzett komplex geofizikai adatfeldolgozásról szól.

Kummer István

1951-ben született Pápán. Középiskolába a pápai Türr István Gimnáziumba járt, ahol 1969-ben érettségizett. Egyetemi tanulmányait a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen végezte, ahol 1974-ben geofizikusmérnöki diplomát kapott. Végzése után kezdte el szakmai munkáját a M. Áll. Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben (ELGI).

Először kiértékelő és értelmező geofizikus terepi csoportnál. Szakterülete: közepes és nagy mélységű (földkéreg) szerkezetkutatás, medencealjzat-kutatás reflexiós és refrakciós módszerrel elsősorban hegyvidéki környezetben (Börzsöny, Velencei-hegység, Zselic, Mecsek, Mátra, Zempléni hegység, csehszlovákiai mérések).

1980–1982 között a mongóliai komplex regionális kutatással és részletező érc kutatással foglalkozó Nemzetközi Földtani Expedícióban szeizmikus méréseket végzett (ÉK-Mongólia és Góbi sivatag). Utána terepi szeizmikus kutatócsoportot vezet elsősorban alföldi szénhidrogén-kutatási feladatokkal, valamint ausztriai reflexiós mérésben vett részt.

Később: szénhidrogén-kutatási témákban értelmezési, térképezési feladatokat végez. Ezek: karotázsadatok és szeizmikus adatok integrált feldolgozása, értelmezése, mezőn belüli feladatok (Szeghalom, Kiskundorozsma kutatási területek).

1988–1990: Kubában a Kubai Nemzeti Geofizikai Vállalatnál kis mélységű reflexiós és refrakciós módszerrel történő méréseket végzett az ELGI ESS műszerével, kiértékelésen, értelmezésen dolgozott. Adatfeldolgozó programrendszer elkészítéséhez spanyol nyelvű útmutatót készített.

1990–1995: Általános értelmezési feladatokat végzett a szénhidrogén-kutatás területén. Tanulmányozott szakterület: integrált adatfeldolgozási és értelmezési feladatok, kis mélységű gáztelepek szeizmikus vizsgálata, a közvetlen szénhidrogén-detektálás lehetőségeinek tanulmányozása, komplex csatornaanalízisek. Részt vett konferenciákon a fenti tárgyú anyagokkal.

1995–1997: Részt vett a MÁFI-val és MGSZ-szel közös programban Magyarország szénhidrogén potenciáljának felmérése céljából, majd 1993–2003 között a „Magyarország földtani térmodellje” c. kutatási programban.

2003-tól különböző adatbázisokkal, térinformatikával, szeizmikus értelmezéssel kapcsolatos feladatokban dolgozik, pl. országos pretercier medencealjzat-térkép készítése mélyfúrási és szeizmikus adatok alapján. Jelenleg részt vesz a geotermikus programban.

Magyar Balázs

1951-ben született Kéthelyen. A budapesti Szabó József Geológiai Szakközépiskolában 1969-ben érettségizett. A leningrádi Bányászati Egyetemen végzett hidrogeológiai szakon 1974-ben, majd 1975-ben geofizikus-bányamérnöki szakon szerzett újabb diplomát. 1975-ben kezdte meg munkáját az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben.

Munkába lépését követően több jelentős kutatási feladatot irányított, a bős-nagymarosi vízlépcsőrendszer geofizikai előkutatása, a bicskei Gyűjtőerőmű földtani-geofizikai előkutatása, zákány-örtilosí magas part vizsgálata és a Balaton medence geofizikai – tektonikai kutatása.

1981-től 1984-ig a Mongóliai Nemzetközi Földtani Expedíció főgeofizikusa és a magyar expedíció vezetője. Az irányításával működő expedíció jelentős ezüst-, polimetallikus és ritka földfemes lelőhelyet kutatott meg eredménye-

sen, a „Mongólia Földtana” geofizikai fejezetének egyik szerzője.

1984-ben kezdte meg a mérnökgeofizikai szondázás földtani minősítő kritériumrendszerének kidolgozását.

1984-től 1989-ig a Holguini Földtani Expedíció főgeofizikusaként dolgozott. Munkájának legeredményesebb része a metamorf kőzetek és bázikus, ultrabázikus kőzetek szerkezetének meghatározása, komplex geofizikai jellemzőinek leírása volt.

Hazatérése után a pusztamiskei bauxit-elő kutatási programot irányította eredményesen, majd a környezetvédelmi kutatások műszaki-technikai fejlesztése határozta meg munkásságát.

A környezetgeofizika területén gyors szakmai elismerést szerzett, a szovjet csapatkivonás során alkalmazott kutatási metodika egyik kidolgozója. Osztályvezetői tevékenysége során az ELGI magyarországi környezetvédelmi munkáinak meghatározó és elismert szereplőjévé vált. Az általa kifejlesztett önjáró mérnökgeofizikai szondázással a 174 volt szovjet katonai objektumból 124 vizsgálatát végezte el az Intézet.

A Magyar Államvasutak környezetvédelmi feladatainak megoldásában is meghatározó szerepet játszott vezetésével az ELGI. A 90-es évek első felére az Intézet környezetvédelmi tevékenysége országos elismertséget kapott, és a geofizika a környezetvédelmi kutatások meghatározó módszerévé vált. A megrendelők köre kiegészült a MOL Rt.-vel, a MALÉV Rt.-vel a Környezetvédelmi Minisztériummal és az ÁPV Rt.-vel.

1996 áprilisától munkáját az ELGOSCAR Kft.-ben folytatta, de az ELGI munkatársaival szakmai és emberi kapcsolata nem szakadt meg.

Az általa vezetett ELGOSCAR–2000 Kft. 1998-ban megkapta a „Legjobb földtani jelentés” díját, 2009-ben a svájci és az angol környezetvédelmi hivatalokkal együtt ún. EMAS európai környezetvédelmi vezetési díjat és európai technológiai és kutatási díjat kapott.

2010 tavaszán Magyar Balázs a Mérnöki Kamara Életmű-díját kapta. Oktatási tevékenysége elismeréseként 2003-ban a Debreceni Egyetem, 2006-ban a Soproni Egyetem címzetes egyetemi docense címet adományozott neki.

László István

1958-ban született Budapesten. A budapesti Szabó József Geológiai Szakközépiskolában érettségizett 1976-ban. Egy héttel az érettségije után került az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetbe. Szeizmikus terepi csoportnál kezdett dolgozni Debrecenben, kitűzői beosztásban.

1977-től a Vibroseis csoporthoz helyezték át, s ennél a csoportnál dolgozott 1982-ig. A terepi munkát, a kitűzést nagyon megszerette. Magasabb szinten is szerette volna művelni a geodéziát, ezért 1982–86 között (levelezőn) elvégezte a székesfehérvári Földmérési Főiskolát.

1986-tól a szeizmikus csoportok geodéziai munkáinak vezetője lett, ekkor még négy csoport dolgozott egyidejűleg. 1994-ben, a 93-as év végi nagy leépítést követően, a

négy csoport megmaradt terepi dolgozóiból egyetlen új csoportot szerveztek, melynek geodétája, később csoportvezetője lett. A 2000-es évek elejétől más főosztályok számára is végzett geodéziai munkát. 2007-től a térképtár kezelése is feladatává vált. 2008-ban alakult meg a Geodéziai Osztály, melynek osztályvezetője lett. 2010-től az ELGI Geodéziai Osztálya a Bányászati és Földtani Hivatallal való együttműködés keretében és megbízásából mind az öt bányakapitányság működési területén hatósági ellenőrző bányaméréseket végez. Ebben az évben ez adta a terepi munkáink döntő részét.

Repka Lajos

1945-ben született Kisvárdán. Középiskolába a budapesti Landler Jenő Híradásipari Technikumba járt, ahol 1963-ban érettségizett. 1972-ben lett az ELGI munkatársa, és technikusként kezdett dolgozni. 1973-tól 1977-ig a Kandó Kálmán Műszaki Főiskolán tanult, és üzemmérnöki diplomát szerzett.

1978-tól 1979-ig a 200 °C-os gamma–gamma sűrűségmérő, valamint a 200 °C-os neutron–neutron porozitásmérő szondák fejlesztésén dolgozott más kollégákkal együtt. 1980-ban egyéves méréssorozatokat hajtott végre a gamma–gamma és neutron–neutron szondákkal Szíriában a Gamma Művek szervezésében. 1981-től 84-ig univerzális, a 150 °C-os nukleáris szondaelektronika fejlesztésén dolgozott, eredményesen.

1988-tól 1990-ig műanyagházas, többparaméteres ellenállásmérő szonda fejlesztésével foglalkozott, valamint bemutató- és átadóméréseket végzett Tunéziában. 1993-ig a szondamultiplikálás csoportvezetőjeként évi 50–100 db, különböző típusú szonda gyártásának irányítását végezte.

2003 végén kilépett az ELGI-ből a mélyfúrás-geofizikai szondák fejlesztésének és gyártásának megszűnése miatt. 2004-től mint egyéni vállalkozó a GEO-LOG Kft.-nél dolgozik.

Somogyi Sándor

Somogyi Sándor 1948-ban született, a Bláthy Ottó Erőssármú Technikumban végzett tanulmányai után a Villamos Automatikai Intézetben, valamint a Villanszerelő Ipari Vállalatnál dolgozott.

1974-ben került a Geofizikai Intézetbe és 34 év munkaviszony után 2008-ban az Intézetből vonult nyugdíjba. Az Intézetnél töltött évek alatt elvégezte a felsőfokú geofizikusi tanfolyamot.

A Szeizmikus és Számítástechnikai Főosztály, majd később a Mérési Főosztály munkatársaként a szeizmikus terepi kutatásokban mint észlelő és műszer karbantartó tevékenykedett. Megismerte és dolgozott az Intézet történetében használt szinte valamennyi szeizmikus műszerrel. Munkája során használta a Pionir, SZM–24, ESS, SDT–1, SDT–2, SD–10, CFS, DFS-V., SERCEL, MDS–18 mérőműszereket, és tevékeny részt vállalt a geofonok és kábelek javításában és felújításában is. Munkáját mindig lelkiismeretesen és

nagy szakmai hozzáértéssel végezte. Az észlelői munkán túl mindig igyekezett a csoport munkáinak szervezésében is részt venni.

A hazai terepi kutatások mellett részt vett számos expedíciós munkában. Tagja volt 1976 és 1978-ban a csehszlovákiai szeizmikus csoportnak, 1981–1983 között a Mongóliában dolgozó Nemzetközi Földtani Expedíció tagja, 1986-ban és 1989-ben az Ausztriában végzett szeizmikus kutatások észlelője. 1990-től a magyarországi vibroszeiz kutatásokban észlelőként dolgozott egészen 2008-ban bekövetkezett nyugdíjba vonulásáig.

Feladatait a sokszor mostoha terepi körülmények között is hibátlanul igyekezett elvégezni.

Tasnádi Henrikné

1944-ben született Budapesten. A Landler Jenő Gépipari Technikumban érettségizett 1962-ben. Ezt követően elektrotechnikusként dolgozott a Geofizikai Mérőműszerek Gyárában. 1965-ben kezdte meg tanulmányait a Kandó Kálmán Műszaki Főiskola Elektrotechnikai Szakán, ahol 1969-ben gyengeáramú üzemmérnöki diplomát szerzett.

1971-ben lépett be az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetbe, ahol a Mélyfúrás-Geofizikai Főosztályra került. A Műszerfejlesztési Osztályon kezdett dolgozni. Feladata az ionizációs sugárzást mérő mélyfúrás-geofizikai szonda gamma-sugárzást érzékelő Geiger–Müller számlálócsöves detektorának kiváltása szcintillációs detektorral, melyet fotoelektron-sokszorozó és különböző méretű kristályegyüttes alkalmazásával valósított meg. A kifejlesztett egysatornás gamma-szonda új nukleáris szondacsalád kiépítését tette lehetővé változatos kombinációban, kiszolgálva ily módon a hazai és a környező országok nyersanyag-kutatási igényeit, de a szondák eljutottak a távoli Indiába és Kubába is.

1980-ban új, ún. technikai szonda fejlesztésére került sor, amely a fűrólyuk átmérőjének és hőmérsékletének pontos mérésére szolgált. Részt vett e szondatípus fejlesztésében különböző detektorkombinációkkal, a szondacsalád további bővítésében, bemérésében és javításában is. A többparaméteres mélyfúrás-geofizikai szondapark kiépítésének és kiszériás gyártásának egyik témavezetője volt, tevékenyen részt vett a fejlesztési-tervezési munkákban, bemérésekben és javításokban egyaránt.

1992-től az adattári munkát végezte. A Geofizikai Intézetben az évek során elvégzett mélyfúrás-geofizikai szelvények, valamint a MÁFI adattárában lévő szelvények digitális adatbevitelét végezte 1997-es nyugdíjba vonulásáig. A munkát ezután sem hagyta abba, s jelenleg a Geo-Log Környezetvédelmi és Geofizikai Kft.-ben a geofizikai mérések feldolgozását végzi.

Dr. Törös Endre

1955-ben született Nádudvaron. Középiskolai tanulmányait követően Hajdúszoboszlón a Högyes Endre Gimnáziumban érettségizett 1974-ben, egyetemi tanulmányait a miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen a Bányamérnöki Kar

Műszaki Földtudományi Szakának geofizikai tagozatán végezte. 1979-ben szerzett geofizikus mérnöki oklevelet az „Az egyenáramú vágat- és telepszondázás elméletének összefoglalása és gyakorlati eredményeinek bemutatása” c. diplomamunkájával.

Egyetemi tanulmányai idején „Gyűrt szerkezetek paleomágneses vizsgálata” c. TDK-dolgozatával egyetemi első helyezést ért el, valamint az egyetemi matematikai versenyeken is első helyen végzett. Megkapta a Tanulmányi Emlékérem ezüst fokozatát.

1979–1989 között a Nógrádi Szénbányánál a bányageofizikai szolgálat megszervezése és vezetése volt a feladata. Ennek keretében fontosabb tevékenységei a teljes terű telepszondázás 4 réteges elméleti görbéinek számítása, induló frontfejtések telephullám-átvilágítása, szeizmikus reflexiók kutatások végzése, illetve végeztetése, peremi külfejtések geofizikai kutatása egyenáramú elektromos és refrakciós szeizmikus módszerrel és bányabeli izotópos szénkarotázsmérések végzése voltak.

1989-től az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben dolgozik, 1990-től a Mérnökseizmikus Osztály vezetőjeként, 1996-ban a Kutatási Főosztály vezetőjének helyetteseként, 1998-tól a Mérnökgeofizikai Főosztály vezetőjeként.

Az ELGI-ben végzett fontosabb tevékenységei a következők: (kezdetben) bányageofizikai kutatások, üregkutatás, partfalvédelem geofizikai módszerekkel, környezetvédelmi geofizikai kutatások és mérnökgeofizikai kutatások.

1992-ben egy OMFB-pályázat projektvezetője, melynek feladata a dinamikus Young-modulus és Poisson-hányados meghatározása kis mélységű fűrólyukak közötti szeizmikus átvilágítással.

1996-tól témafelelős az atomerőművi kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére irányuló programban.

1999-ben nemzetközi szakmai konferenciát szervez Budapesten (Environmental and Engineering Geophysical Society-European Section 1999, Budapest). 2001-ben részt vesz a „Construction Technology in Underground” Japan International Cooperation Agency szaktanfolyamán Tokióban.

2007-ben PhD-fokozatot szerez a Nyugat-magyarországi Egyetemen, értekezésének témája „A szeizmikus módszer geotechnikai alkalmazásainak kritikai vizsgálata”.

Jelenleg tagja a Magyar Geofizikusok Egyesületének, az EAGE-nek (*European Association of Geoscientists & Engineers*) és az EGS-nek (*European Geophysical Society*).

Az EAGE-ben a Chairman of Near Surface Division tisztséget töltötte be 2005-től 2007-ig. Jelenleg a Near Surface Geoscience és az Award (kitüntetések véleményező/adományozó) bizottságoknak a tagja, valamint vezetője az EAGE Budapest Local Chapterének és az ISSMGE Magyar Nemzeti Bizottságának (*International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*) az ISSMGE „geophysical site characterization”-nal foglalkozó nemzetközi szaktanárságának.

Baráth István



A kitüntetettek az ELGI igazgatója, *Dr. Fancsik Tamás* és az ELGA kuratóriumi elnöke, *Pályi András* társaságában (b–j.: *Somogyi S.*, *Gömböcz L.*, *Dr. Kiss J.*, *László I.*, *Dr. Törös E.*, *Dr. Fancsik T.*, *Magyar B.*, *Kummer I.*, *Pályi A.*, *Repka L.*)



A vidám ünnepség előtt a gondterhelt igazgatóhelyettesek megfontolt beszélgetése (*Dr. Chikán G.* – MÁFI, *Jánvári J.* – ELGI)



Az ünnepség előtti jó hangulat (b–j.: *Dr. Drahos D.*, *Zsille A.*, *Dr. Nemesi L.*, *Hobot J.*, *Dr. Müller P.*)



A nyugdíjba menők hagyományos ajándéka a tokaji aszú. *György Lajos* búcsúzói főosztályvezetőnek átadja *Dr. Fancsik T.*



A kitüntetés utáni gratuláció. A kitüntetettek: *Kummer I.* és *Somogyi S.*, őket köszönti *Dr. Baráth I.*

Magyar cikk vezeti az olvasottságot

Létezik az világhálón egy „SciVerse ScienceDirect” elnevezésű oldal, amelyik az Elsevier birodalom hatáskörébe tartozó szaklapok olvasottságát figyeli negyedéves periódusokban.

A 2010-es negyedik negyedévi periódusban a *Journal of Applied Geophysics* olvasottságát, a rangsorba állított ún.

„Top 25 Hottest Articles” listát Gyulai Ákos, Ormos Tamás és Dobróka Mihály tagtársaink „A quick 2-D geoelectric inversion method using series expansion” című cikke vezeti. Ez a cikk a „Top 1 Hottest Article”.

Gratulálunk!

Bodoky Tamás

A Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának felhívása

A Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kara felhívást intéz az Alma Mater egykori hallgatóihoz, akik 1941-ben, 1946-ban, 1951-ben a Bányamérnöki Karon vagy a Földmérőmérnöki Karon Sopronban, valamint azokhoz, akik 1961-ben a Bányamérnöki Karon Miskolcon vették át diplomájukat. Kérjük és várjuk a 70, 65, 60, 50 évvel ezelőtt diplomát szerzettek jelentkezését, hogy részükre jogosultságuk alapján a rubin-, gyémánt-, vas- vagy az aranyoklevél

kiállítása érdekében szükséges intézkedéseket meg tudjuk kezdeni.

Kérünk minden érintettet, hogy 2011. március 31-ig jelentkezzen, adja meg nevét, elérhetőségét (lakcím, telefonszám, e-mailcím), illetve az alábbi címre küldje meg oklevelének fénymásolatát, a kiadványban megjelentetni kívánt rövid szakmai önéletrajzát (maximum egy oldalban, a kiadvány korlátozott terjedelme miatt) és 1 db igazolványképet.

Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Dékáni Hivatal
3515 Miskolc-Egyetemváros
Telefon: +36/46/565-051
Fax: +36/46/563-465
E-mail: rekbdhiv@uni-miskolc.hu
Baracza Mátyás Krisztián
hivatalvezető

A Balkán Geofizikai Kongresszusról

Amint azt a *Magyar Geofizika* előző számában már ismertettük, idén ősszel, október 3. és 6. között Egyesületünk szervezi a Balkán Geofizikai Társaság (*Balkan Geophysical Society*) háromévenként esedékes kongresszusát (BGS2011). Folyik a szervezés, új és még újabb feladatokkal szembesülünk. Angol nyelvű honlapunkra (www.bgs2011.hu) fokozatosan kerülnek fel az ismertetőik és a jelentkezési lapok, a

magyar nyelvű honlapon (amely a www.mageof.hu címen érhető el) a hazai közönségnek szóló előzetes információk olvashatók (például a program). Az alábbiakban olvasóink és a hazai földtudományi szakma figyelmét szeretnénk felkelteni a részvételre, s evvel együtt támogatásra szeretnénk buzdítani.

Használja ki a publikációs lehetőséget, jelentkezzen előadással!

Ha végignézzük az eddigi kongresszusok kiadványait, láthatjuk, hogy mindegyik rendező ország (sorrendben Görögország, Törökország, Bulgária, Románia, Szerbia) kihasználta a „hazai pálya előnyeit”: az előadások jelentős része a rendező ország földtudományi eredményeiről szólt. Ennek két oka is lehet. A szervezők okosan arra törekedtek, hogy az előadók megfelelő módon reprezentálják saját országuk kutatási eredményeit. A másik okot talán úgy lehetne egyszerűen megfogalmazni, hogy *kedvező áron* jutottak nemzetközi publikációs lehetőséghez a hazai előadók. Az elfogadott előadások (bővített) tartalmi kivonata rajta lesz a BGS2011 CD-kiadványán, olvasható lesz az EAGE

EarthDoc rendszerében, egyes (formailag és tartalmilag megfelelő) előadások pedig teljes terjedelemben megjelenhetnek a Balkán Geofizikai Társaság elektronikus lapján (www.jbgs.org).

A kongresszus (az alapítók eredeti szándéka szerint is) nemcsak a szűken vett általános és gyakorlati geofizikai, hanem a szélesebb értelemben vett földtudományi kutatásoknak is fórumot kíván adni. Itt a rendező elv a regionalitás: reményeink szerint elsősorban a Kárpát–Balkán terület földtani, környezetvédelmi, nem megújuló energiapolitikai kérdései is szerepet kapnak az előadásokon.

Az előadások regisztrációjának határideje: 2011. július 1.

Kérjük, jelentkezzen előadásával a honlap regisztrációs lapján (www.bgs2011.hu)!

Használja ki az üzleti lehetőséget, vegyen részt kiállítóként a műszerkiállításon!

Minden (akár nagyobb, akár kisebb) kongresszus egyik vonzóereje a *műszerkiállítás*, amely megismerteti látogatóit a technika fejlődésével, és jó lehetőséget teremt a kapcsolatok építésére. Terveink szerint ezen a kiállításon nemcsak az élvonalbeli (nyugati) kiállítók lesznek jelen, hanem a régió kisebb műszergyártó és szolgáltató cégei is, valamint azok a hazai cégek, amelyek erősíteni akarják regionális jelenlétüket. A helyszín (a *Hotel Mercure Buda*) kellő helyet biztosít mind a külföldi, mind a hazai kiállítóknak.

Az élvonalbeli geofizikai műszergyártó cégek megértették azt az üzenetet, hogy Budapesten olyan potenciális vevőkört is el tudnak érni, amelynek nincs pénze messzire utazni a rangos műszerkiállításokra. Eddig (március 15-ig) a következő, közismert cégek jelezték részvételüket:

- Sercel és IRIS Instruments (Franciaország),
- GF Instruments (Csehország),
- DMT és Geotomographie (Németország),
- Advanced Geosciences Europe (Spanyolország),
- DECO Geophysical (Oroszország),
- Robertson Geologging (Anglia),
- Zonge (USA).

A helyek egy része tehát már elkelt, de még bőven van hely a hazai kiállítóknak is.

A műszergyártó cégeknek kézenfekvő reklámlehetőséget nyújt az, hogy az előadások szünetében műszerbemutatót rendezünk a Vörösmarty téren, a kongresszus helyszínétől látótávolságban. Nyilvánvaló, hogy a hazai cégek itt előnyben vannak, hiszen előzetesen kipróbálhatják technikájukat a Vörösmarty téren.

A kedvezményes kiállítói regisztráció határideje: 2011. április 30.

Kérjük, foglalja le kiállítási területét a honlap kiállítóknak szóló lapján!

Használja ki a kapcsolatépítési lehetőséget, vegyen részt a kongresszuson!

Szándékaink szerint a kongresszuson nemcsak az alapító országok, hanem az összes balkáni és környékbeli ország képviselői jelen lesznek. Ennélfogva (a tudományos információátadáson, eszmecserén túlmenően) ez az esemény lehetőséget biztosít tudományos és üzleti kapcsolatok létrehozására/felújítására, amelyek hasznosak lehetnek a jövőben. Amikor a balkáni országok képviselőivel beszélgettünk, mindannyian aláhúzták: a régió szerepe fel fog értékelődni, mivel a közeli vagy a kissé távolabbi jövőben

valamennyi balkáni ország az Európai Unió keretében képzele el gazdasági fejlődését. Ebben a fejlődésben szerepük van a regionális geofizikai kapcsolatoknak is: a BGS alapítói ezt már a görögországi Florinában 1993-ban felismerték. A széles körű (külföldi és hazai) részvétel érdekében tudatosan törekedtünk a részvételi (regisztrációs) díjak alacsonyán tartására még annak tudatában is, hogy a részvételi díjaknak a szükséges kiadások (bérleti díjak) nagy részét kell fedezniük.

Részvételi díjak és terminusok a 6. Balkán Geofizikai Kongresszuson

	Kedvezményes (júl. 31-ig) (€)	Teljes (aug. 1-je után) (€)
Teljes részvételi díj	190	240
Ifjúsági részvételi díj	100	150
Ifjúsági előadó kedvezménye	50	(nem lehetséges)
Részvételi díj a banketten	40	40

Valamennyi, itt euróban megadott árat napi árfolyamon számítva, természetesen forintban is be lehet fizetni. Csak a teljes részvételi díjak tartalmazzák a bankett (esti hajókirándulás és vacsora) díját. Ifjúsági kedvezményben az részesül, aki a kongresszus megkezdésekor még nem töl-

tötte be 30. életévét (azaz 1981. október 3. után született). További kedvezményt kap az az ifjúsági résztvevő, akinek akár szóbeli, akár poszterelőadását a programbizottság elfogadta, a kedvezmény előadásonként egy előadónak jár. A részletesebb feltételek a honlapon olvashatóak.

Kérjük, vegyen részt a kongresszuson, regisztrálja magát résztvevőként!

Használja ki a reklámlehetőséget, legyen a kongresszus szponzora!

A Balkán Geofizikai Kongresszusra várunk olyan támogatókat (szponzorokat), akik/amelyek részére a kongresszus gazdaságos reklámfelületet tud biztosítani. Csak megismételni tudjuk azt az indokot, amelyet a műszerkiállításról írtunk: a kongresszus résztvevői olyan régióból jönnek, amely üzleti lehetőséget kínál. A szponzorok „üzenetei” mindenki számára láthatók lesznek, a szponzor hírét elviszik a régió országaiba, méghozzá szakemberek, tehát hozzáértők viszik el (exkluzivitás).

A nemzetközi geofizikai rendezvényeken szokásos módon minél szélesebb körű támogatói kört várunk. A fő-támogató logója díszíti majd az előadások háttérét. Magát

a kongresszusi táskát (*congress bag*) és a benne elhelyezett reklámanyagokat a résztvevők biztosan hazaviszik. A „kávépontokon” az ezeket a pontokat szponzoráló cég nevét mindenki meg fogja jegyezni. Ez a felsorolás nem teljes, még további ötletek is megvalósításra várnak (a teljes kínálatot és ezek árait a honlap szponzorációs lapján lehet olvasni).

A támogatók részére nemes feladatnak kínálkozik az ifjúsági résztvevők támogatása. A junioroknak külön programokat tervezünk, amelyen a részvételüket szolid áron kell biztosítanunk.

Kérjük, támogassa a kongresszust, válasszon a szponzorációs lehetőségek közül!

A BGS2011 Szervezőbizottsága nevében
Késmárky István



A kongresszus egyik műszerkiállítási helyszíne – a beépítendő terület – a nagy előadóterem előtt



A kiállítás látványterve. További tervek a www.bgs2011.hu honlapon láthatók

Rendezvénynaptár

2011. április		
2011. ápr. 3–8.	European Geoscience Union közgyűlése (http://meetings.copernicus.org/egu2011)	Bécs, Ausztria
2011. ápr. 10–13.	AAPG évi kongresszus és kiállítás (http://www.aapg.org)	Houston, USA
2011. ápr. 12–14.	EAGE IOR 2011 (http://www.eage.org)	Cambridge, Nagy-Britannia
2011. ápr. 15.	A Magyar Geofizikusok Egyesületének évi rendes közgyűlése	Budapest, ELGI
2011. ápr. 18.	„Budapest Student Lecture Tour Europe” – az EAGE egyetemi előadás-sorozata: Geological Storage of CO ₂	Budapest, ELTE, Lágymányos
2011. ápr. 20.	„Új utak a földtudományban” előadássorozat Védőpajzsunk: a geomágneses tér	Budapest, ELGI
2011. május		
2011. május 18.	„Új utak a földtudományban” előadássorozat Primer energiaforrásaink	Budapest, ELGI
2011. máj. 23–26.	EAGE, 73. évi kongresszus és műszerkiállítás (http://www.eage.org)	Bécs, Ausztria
2011. szeptember		
2011. szept. 12–14.	EAGE Near Surface 2011 (http://www.eage.org)	Leicester, Nagy-Britannia
2011. szept. 18–23.	SEG 81. évi kongresszus és kiállítás (http://www.seg.org)	San Antonio, USA
2011. szept. 21.	„Új utak a földtudományban” előadássorozat Az állam földtani feladatai	Budapest, ELGI
2011. október		
2011. okt. 3–6.	A Balkán Geofizikai Társaság 6. kongresszusa (http://www.bgs2011.hu)	Hotel Mercure Buda, Budapest
2011. okt. 12.	„Új utak a földtudományban” előadássorozat Föld és élet. Óceánok	Budapest, ELGI

EAGE: European Association of Geoscientists and Engineers; *SEG:* Society of Exploration Geophysicists; *AAPG:* American Association of Petroleum Engineers

További részletek, referenciák a honlapról (<http://www.mageof.hu>) érhetők el.

Kakas Kristóf

Útmutató a szerzőknek

A Szerkesztőségnek és mindenekelőtt a technikai kivitelezésben sok felesleges munkát okoznak a nem megfelelő formában átadott kéziratok. Ezért közöljük, hogy az anyagokat milyen szerkezeti, formai követelményeknek eleget téve kérjük beküldeni.

Minden anyagot digitális formában, elektronikus postán keresztül kérünk beküldeni vagy digitális adathordozón átadni, Bodoky Tamás főszerkesztő címére: bodoky@elgi.hu. Kivételt fényképek vagy egyéb grafikák jelentenek, amelyeknek a digitalizálását szükség szerint meg tudjuk oldani.

Szaccikkek, tanulmányok

A leadott cikknek a következőket kell tartalmaznia:

- Cím magyarul
- Cím angolul
- Rövid magyar cím az élőfejben (60 karakternél nem hosszabb)
- Szerző(k) teljes neve(i) a kívánt sorrendben, számozással megkülönböztetve az elérhetősége(ke)t
- Legalább egy szerző elérhetősége (címe és/vagy e-mail címe)
- Összefoglaló (absztrakt) magyarul
- Összefoglaló (absztrakt) angolul
- A cikk szövege magyarul
- Hivatkozások
- Ábraaláírások számozva, magyarul (ha vannak ábrák)
- Ábraaláírások számozva, angolul
- Ábrák számozva (ha vannak), a szövegtől külön fájlban.

Szöveg

Általános elvként hangsúlyozzuk, hogy a kézirat szöveges részét általánosan használt szerkesztők szövegformátumában (txt, doc, rtf, tex stb.), egyszerű egyhasábos alakban kérjük beküldeni. A szöveg tagolása legyen egyértelmű: főcím (esetleges alcím), számozott v. jelzett, hierarchikus fejezetcímek, ill. bekezdések szerepeljenek. Eltekintve a *kiemelésektől*, esetleges számozott vagy tételezett *felsorolásoktól*, kerülendő minden más szövegformázás, stílusok alkalmazása. A szövegfolyam tartalmazhatja az ábrák, táblázatok *ajánlott* elhelyezését.

Jegyzetek

A folyóiratban nem alkalmazunk hagyományos *lábjegyzeteket*; ezek helyett ún. *végjegyzetek* jelennek meg a szövegfolyam végén. A jegyzetek jelölése az abc betűivel: ^{a)}, ^{b)} stb. – vagy ha sok van ezekből – számozással: ¹⁾, ²⁾ stb. történjék mind a szövegben, mind a jegyzetek esetén.

Táblázatok

A táblázatok összeállítását legegyszerűbb esetben teljesen elegendő szöveges formában megtenni. A kötelező elemek: a táblázat sorszáma, táblázatszöveg (magyarul), fejléc, sorok/oszlopok, esetleges megjegyzések. Egy soron belüli cellák elválasztása egymástól tabulátorjellel (→), a sorok végén bekezdéssjellel (¶) történhet. (Ugyanezt megkaphatjuk egy formailag megszerkesztett táblázat szöveggé történő konvertálásával.)

Matematika

A matematikai képletek szerkesztése történhet a szövegszerkesztő képletszerkesztőjével vagy külön szöveges formában (pl. T_PX, MathML formula). Skalárok, vektor-, mátrix-, tenzorkomponensek kurzív latin betűkkel (x , v , I , H_z , S_{kl}), ill. görög jelekkel (α , δ_μ , Δ , Ψ);

vektorok félkövér jelekkel (\mathbf{m} , \mathbf{H}_z , \mathbf{p}); operátorok, tenzorok, mátrixok írott v. kalligrafikus \mathcal{A} , \mathcal{U} (de mindenképpen megkülönböztetett, megjegyzésben közölt) jelekkel szerepeljenek, szinkronban a szövegben használt jelekkel. Legyenek szintén egyértelműen megkülönböztetve a hasonló kinézetű betűk, mint pl. a latin v és görög v.

Hivatkozások

A hivatkozások pontosságáért a szerző(k) felel(nek). Kérjük ellenőrizni, hogy a hivatkozások listájában nem fordulnak elő a szövegben szereplőkhöz képest sem felesleges, sem hiányzó hivatkozott tételek.

A folyóiratban, a *szövegben* alkalmazott hivatkozási formák: pl. (Edwards 1977); (Taylor, Fleming 1988); (Bosch et al. 2002); (White 2008a, 2008b, El-Qady et al. 2009), ill. „... Bosch et al. munkája (2002) taglalja ...” stb. A cél, hogy a *nevek és évszámok* alapján az olvasó egyértelműen azonosítani tudja hivatkozott munkákat.

A *hivatkozások listájában* (irodalomjegyzékben) használt formák:

Cikkek esetén: szerző(k), megjelenés évszáma, cím, folyóirat neve, évfolyama, füzetszáma, a cikk oldalszáma (től-ig): Ackermann H. D., Pankratz L. W., Danserau D., 1986: Resolution of ambiguities of seismic refraction traveltimes. *Geophysics* 51/2, 223–235

Könyvek esetében: szerző(k), megjelenés évszáma, könyv címe, könyv kiadója, kiadás helye: Tarantola A., 1987: *Inverse Problem Theory*. Elsevier, Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo

Gyűjteményes kötetek (könyvfejezetek) esetén: szerző(k), megjelenés évszáma, cikk címe, kötet címe, kötet szerkesztője, kötet kiadója, kiadás helye (től-ig oldalszáma): Nettleton L. L., (1939): Determination of density for reduction of gravity observations. In: *The rapid calculation of potential anomalies*. Ed. Parker R. L., Vrije Universiteit, Amsterdam, pp. 176–183

Illusztrációk

A szokásosan előforduló képek, grafikák, grafikonok – általánosan: *ábrák* – lehetnek fényképek, szerkesztett raszteres (*pixels*: jpg, tif, bmp stb.) vagy vonalas (*vektoros*: ps, eps, ai, wmf, emf stb.) grafikák. Kérjük mindig az (ábra)szerkesztővel kapott *eredeti* grafikákat *külön mellékelni* a dolgozathoz (és nem beszerkesztve).

A *raszteres* képek (fényképek) felbontása lehetőleg 150–300 dpi pixeltartományban legyen, a *vektorábrák* esetén pedig egy-egy ábra teljes objektumkészlete lehetőleg legyen csoportosítva („group” opció), hogy ne „csússzon szét” az ábra. Vonalas ábrákat lehetőleg ne konvertáljanak raszteres képformátumba, mert az jelentős minőségvesztéssel jár (szöveg, vonalak „elkenődnek”, és elvész az utószerkesztés lehetősége).

A folyóirat *digitális* változatában lehetőség van *minden* ábra eredeti *színes* közzétételére. Emellett ún. *hiperlinkek* szerepelhetnek a dolgozatokban, ill. internetes címek online elérése céljából. Ezen túlmenően szintén lehetőség van (körbeforgatható) 3D-s ábrák (u3d stb.), multimédia-fájlok (swf, avi stb.) beillesztésére is. Ez utóbbi esetekben a nyomtatott folyóiratban természetesen csak egy sztatikus ábra, ill. állókép megjelenítése lehetséges.

Egyéb anyagok

A hírek, beszámolók vagy közlemények tartalmára és formájára nincsenek hasonló megkötéseink, kivéve, hogy ezeket is a legegyszerűbb szöveges formában, tördelés nélkül kérjük átadni. Az illusztrációkra a fentiekben leírtak vonatkoznak.

